



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS PENGARUH KAPASITANSI TERHADAP
FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK
MENGUNAKAN DIAGRAM BIFURKASI**

**JEREMIA SEPTA PRATAMA SINURAYA
NRP 2212 100 109**

**Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
IGN Satriyadi Hernanda ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**ANALYSIS OF CAPACITANCE EFFECT ON POWER
SYSTEM FERRORESONANCE USING BIFURCATION
DIAGRAM**

**JEREMIA SEPTA PRATAMA SINURAYA
NRP 2212 100 109**

Advisor

**Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
IGN Satriyadi Hernanda ST., MT.**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**

**ANALISIS PENGARUH KAPASITANSI TERHADAP
PERERESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK
MENGUNAKAN DIAGRAM BIFURKASI**

TUGAS AKHIR

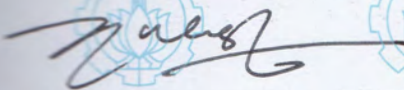
**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

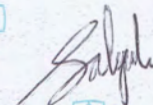
**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,



Dosen Pembimbing II,



I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

NIP. 19700712 199802 1 001

IGN Satriyadi Hernanda ST., MT.

NIP. 19730123 200212 1 001



ANALISIS PENGARUH KAPASITANSI TERHADAP FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN DIAGRAM BIFURKASI

Nama : Jeremia Septa Pratama Sinuraya
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : IGN Satriyadi Hernanda ST., MT.

ABSTRAK

Feroresonansi merupakan salah satu fenomena transien dalam sistem tenaga listrik yang dapat menyebabkan kegagalan pada isolasi peralatan sistem tenaga. Feroresonansi dapat terjadi pada sistem yang memiliki elemen yang bersifat kapasitif seperti kabel, kopling kapasitif, *switching* serta adanya induktansi non-linier seperti trafo. Akibat paduan tersebut, kejadian transien seperti *switching* atau petir dapat memicu munculnya feroresonansi berupa tegangan dan arus lebih dengan tingkat harmonik tertentu yang menerpa peralatan seperti *Capacitive Voltage Transformer* (CVT)

Untuk memahami gejala feroresonansi diperlukan pembahasan yang lebih mendalam khususnya tentang seberapa besar peluang feroresonansi dapat terjadi pada sistem akibat pengaruh komponen/elemen di dalamnya. Salah satu metode yang digunakan adalah diagram bifurkasi, yaitu diagram yang menggambarkan seberapa besar pengaruh elemen kapasitansi terhadap gejala feroresonansi yang dapat terjadi. Pada tugas akhir ini digunakan software komputasi MATLAB untuk mengolah data yang dihasilkan dari simulasi model rangkaian feroresonansi. Hasil simulasi menunjukkan feroresonansi yang dipicu oleh impuls petir terjadi pada range $C_{saluran}$ 0,001-0,07 μF . Feroresonansi akibat *switching* CB muncul pada range C_g 0,001-0,76 μF dan C_s 0,51-3 μF . Sedangkan feroresonansi akibat hubung singkat muncul pada range 0,001-3 μF .

Kata Kunci : Feroresonansi, Capacitive Voltage Transformer (CVT), Induktansi Non-linier, Kapasitansi, Diagram Bifurkasi

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

ANALYSIS OF CAPACITANCE EFFECT ON POWER SYSTEM FERRORESONANCE USING BIFURCATION DIAGRAM

Name : Jeremia Septa Pratama Sinuraya
1st Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2nd Advisor : IGN Satriyadi Hernanda ST., MT.

ABSTRACT

Ferroresonance is one of transient phenomena in electric power systems that can lead to failure of the power system equipment insulation. Ferroresonance can occur on systems that have capacitive elements such as cables, capacitive coupling, switching equipments and the existence of non-linear inductance such as transformers. Due to this combination, a switching transients or lightning strikes can trigger ferroresonance disturbance and generate a voltage and current harmonics over a certain level that hit equipment such Capacitive Voltage Transformer (CVT).

A deeper analysis is needed to understand the symptoms of the ferroresonance specifically about how likely ferroresonance may occur due to the influence of components / elements on systems. One method generally bifurcation diagram. This diagram illustrating how much influence the capacitance element against ferroresonance symptoms that can occur. In this final project, a computation tool MATLAB is used to process data generated from the ferroresonance circuit simulation model. The simulation results show that ferroresonance triggered by lightning impuls occurs at the range of line capacitance 0,001-0,07 μF . Ferroresonance caused by switching impuls occurs at the range of C_g 0,001-0,76 μF and C_s 0,51-3 μF . Meanwhile ferroresonance caused by line-to-ground short circuit occurs at the range of line capacitance 0,001-3 μF .

Keywords : Ferroresonance, Capacitive Voltage Transformer (CVT), Non-linear Inductance, Capacitance, Bifurcation Diagram

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

Halaman Judul	
Lembar Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	
Halaman Pengesahan	
Abstrak	i
Abstract	iii
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Table Of Contents	ix
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel	xii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	3

BAB 2 SISTEM TRANSMISI DAN TRANSFORMATOR TEGANGAN

2.1 Sistem Tenaga Listrik	5
2.2 Sistem Transmisi	6
2.3 Transformator Tegangan	8
2.3.1 Prinsip Induksi pada Transformator	9
2.3.2 Ketidaklinieran pada Inti Transformator	10
2.4 Capacitive Voltage Transformer (CVT)	11
2.4.1 Konstruksi CVT	13
2.4.2 Rangkaian Ekuivalen	14
2.4.3 Komponen Utama CVT	15

BAB 3 FERORESONANSI DAN ANALISIS MENGGUNAKAN DIAGRAM BIFURKASI

3.1 Resonansi	17
3.2 Feroresonansi	19
3.2.1 Pengertian Feroresonansi	19
3.2.2 Penyebab Timbulnya Feroresonansi	19
3.2.3 Gejala-gejala Feroresonansi	21
3.2.4 Pendekatan Fisik Feroresonansi	21
3.2.5 Klasifikasi Feroresonansi	25
3.3 Simulasi Feroresonansi	28
3.4 Diagram Bifurkasi	29

BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI MENGUNAKAN DIAGRAM BIFURKASI

4.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi dan Simulasi pada ATPDraw	35
4.2 Simulasi dan Analisis Menggunakan ATPDraw	38
4.2.1 Keadaan Normal	39
4.2.2 Feroresonansi Akibat Impuls Petir	41
4.2.3 Feroresonansi Akibat Operasi <i>Switching</i> Circuit Breaker	43
4.2.4 Feroresonansi Akibat Hubung Singkat Fasa ke Tanah	45
4.3 Analisis Sensitivitas Menggunakan Diagram Bifurkasi	47
4.3.1 Feroresonansi Akibat Impuls Petir	48
4.3.2 Feroresonansi Akibat Operasi Switching Circuit Breaker	51
4.3.3 Feroresonansi Akibat Hubung Singkat Fasa ke Tanah	57
4.3.4 Perbandingan Hasil Simulasi	59

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	62

LAMPIRAN 65

DAFTAR PUSTAKA 67

BIOGRAFI PENULIS 69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem tenaga listrik	6
Gambar 2.2	Konstruksi transformator	9
Gambar 2.3	Kurva histerisis	10
Gambar 2.4	Layout tipikal gardu induk 500 kV	11
Gambar 2.5	Rangkaian ekivalen CVT	12
Gambar 2.6	Konstruksi CVT	14
Gambar 2.7	Rangkaian ekivalen CVT	15
Gambar 2.8	Komponen utama pada CVT	16
Gambar 3.1	Resonansi seri	19
Gambar 3.2	Rangkaian pemodelan feroresonansi	20
Gambar 3.3	Kurva saturasi induktor non-linier	20
Gambar 3.4	Rangkaian karakteristik dasar feroresonansi	22
Gambar 3.5	Diagram skematik model feroresonansi	22
Gambar 3.6	Grafik hubungan fluks dan arus	22
Gambar 3.7	Osilasi pada rangkaian feroresonansi seri	23
Gambar 3.8	<i>Fundamental mode</i>	26
Gambar 3.9	<i>Subharmonic mode</i>	27
Gambar 3.10	<i>Quasi-periodic mode</i>	27
Gambar 3.11	Chaotic mode	28
Gambar 3.12	Rangkaian ekivalen feroresonansi reduksi	28
Gambar 3.13	Pemodelan rangkaian feroresonansi menggunakan ATP Draw	29
Gambar 3.14	Diagram bifurkasi fungsi kapasitansi seri	30
Gambar 3.15	Langkah-langkah plotting diagram bifurkasi pada MATLAB	31
Gambar 4.1	Single line diagram incoming gardu induk 500kV	33
Gambar 4.2	Pemodelan CVT pada ATPDraw	33
Gambar 4.3	Kurva magnetisasi Trafo Step-Down	34
Gambar 4.4	Rangkaian ekivalen feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan impuls petir	35
Gambar 4.5	Pemodelan rangkaian feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan impuls petir	35
Gambar 4.6	Rangkaian ekivalen feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan switching CB	37

Gambar 4.7	Representasi rangkaian feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan switching	37
Gambar 4.8	Rangkaian ekivalen feroresonansi pada CVT akibat hubung singkat fasa ke tanah	38
Gambar 4.9	Pemodelan rangkaian feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan hubung singkat fasa ke tanah	38
Gambar 4.10	Tegangan primer CVT (V_{primer})	39
Gambar 4.11	Tegangan CVT dalam keadaan normal	40
Gambar 4.12	Sinyal arus impuls petir	41
Gambar 4.13	Tegangan CVT akibat impuls petir	42
Gambar 4.14	Tegangan CVT akibat switching CB	44
Gambar 4.15	Tegangan pada terminal CB saat dibuka	45
Gambar 4.16	Arus hubung singkat dari fasa menuju tanah	46
Gambar 4.17	Tegangan CVT akibat hubung singkat fasa - tanah	47
Gambar 4.18	Efek perubahan nilai C_{saluran}	49
Gambar 4.19	Diagram bifurkasi variasi nilai C_{saluran}	50
Gambar 4.20	Efek perubahan nilai	52
Gambar 4.21	Diagram bifurkasi variasi nilai C_g	54
Gambar 4.22	Efek perubahan nilai C_s	55
Gambar 4.23	Diagram bifurkasi variasi nilai C_s	56
Gambar 4.24	Efek perubahan nilai C_{saluran}	58
Gambar 4.25	Diagram bifurkasi variasi nilai C_{saluran}	59

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Perbandingan antara resonansi linier dengan ferroresonansi	25
Tabel 4.1	Nilai-nilai parameter CVT	34
Tabel 4.2	Tabel parametrik CVT sebelum dan sesudah gangguan petir	43
Tabel 4.3	Tabel parametrik CVT sebelum dan sesudah CB dibuka	45
Tabel 4.4	Tabel parametrik CVT sebelum dan sesudah hubung singkat	47
Tabel 4.5	Tabel parametrik CVT akibat variasi nilai $C_{saluran}$	50
Tabel 4.6	Tabel parametrik CVT akibat variasi C_g	53
Tabel 4.7	Tabel parametrik CVT akibat variasi nilai C_s	56
Tabel 4.8	Tabel parametrik CVT akibat gangguan hubung singkat	58
Tabel 4.9	Tabel komparasi diagram bifurkasi	60

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik merupakan sistem kompleks yang terdiri dari elemen-elemen penting seperti elektrik, mekanik, elektronika, dan kontrol. Salah satu peranan penting dari sistem tenaga listrik adalah menyalurkan energi listrik kepada konsumen secara ekonomis dan ramah lingkungan[12]. Oleh karena itu sistem tenaga listrik tidak dapat terlepas dari perkembangan teknologi yang pesat guna peningkatan keandalan dan kontinuitas sistem. Penyaluran energi listrik yang maksimal harus didukung peralatan-peralatan yang berfungsi secara optimal. Salah satu peralatan yang harus bekerja dengan baik adalah transformator.

Transformator dalam sistem tenaga merupakan peralatan listrik yang menjadi inti dari penyaluran listrik kepada konsumen. Salah satu jenis transformator yang banyak penggunaannya dalam sistem tenaga adalah transformator tegangan (*voltage transformer*). Transformator tegangan merupakan transformator satu fasa *step-down* yang mengubah tegangan sistem ke *level* tegangan rendah, sehingga mampu digunakan untuk perlengkapan indikator, alat ukur, rele, dan alat sinkronisasi. Hal ini diperlukan atas pertimbangan harga dan bahaya yang ditimbulkan tegangan tinggi bagi operator. Transformator tegangan dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *Inductive Voltage Transformer* (ICT) dan *Capacitive Voltage Transformer* (CVT). Pada CVT terdapat pembagi tegangan kapasitif yang diselipkan suatu trafo penengah (*intermediate transformer*) yang merupakan induktor non-linier. Rangkaian ini membentuk suatu rangkaian tertutup yang berpotensi menimbulkan gejala feroresonansi [4].

Feroresonansi secara mendasar didefinisikan sebagai suatu rangkaian resonansi yang melibatkan interaksi antara elemen induktansi non-linier suatu transformator dengan elemen kapasitif pada sistem. Salah satu bahaya yang diakibatkan oleh feroresonansi adalah munculnya tegangan lebih dan arus lebih pada sistem[5]. Tingkat tegangan lebih atau arus lebih yang terjadi dapat berbahaya bagi peralatan listrik. Contoh kerusakan yang dialami adalah pemanasan yang berlebihan pada transformator sehingga dapat menyebabkan transformator tersebut terbakar. Selain berbahaya bagi peralatan, arus dan tegangan yang timbul akibat feroresonansi menjadi sangat berbahaya bagi operator. Efek lain

ketika feroresonansi terjadi adalah kegagalan peralatan proteksi pada sistem. Hal tersebut akan mempengaruhi keandalan dari sistem tenaga listrik. Permasalahan yang timbul akibat feroresonansi harus segera diatasi atau ditangani. Pada dasarnya fenomena ini sangat sulit diprediksi penyebabnya dan karakterisasinya dengan gangguan-gangguan lain. Studi-studi kasus terkait feroresonansi membuktikan bahwa parameter sistem seperti kapasitansi sangat berpengaruh terhadap respon feroresonansi yang terjadi pada sistem. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh nilai kapasitansi terhadap feroresonansi adalah dengan melakukan analisis sensitivitas terhadap perubahan/ variasi nilai kapasitansi..

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana mengetahui fenomena feroresonansi pada sistem tenaga listrik dengan melakukan simulasi pada pemodelan sebuah rangkaian feroresonansi yang terjadi di peralatan *Capacitive Voltage Transformer* (CVT) gardu induk 500 kV. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis pengaruh nilai-nilai kapasitansi yang terdapat pada sistem tenaga listrik terhadap kemungkinan terjadinya feroresonansi pada sistem tersebut, serta menyajikannya dalam bentuk diagram bifurkasi.

Diagram bifurkasi didefinisikan sebagai diagram yang merepresentasikan perubahan kestabilan ataupun perubahan yang signifikan dalam dinamika suatu sistem akibat perubahan nilai parameter dari sistem itu[6]. Metode ini sering digunakan untuk analisis parametrik yang membutuhkan simulasi yang banyak dan waktu yang cukup signifikan. Atau dengan kata lain diagram ini dapat merepresentasikan puluhan bahkan ribuan simulasi dalam satu grafik dua dimensi.

Tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah mengevaluasi range nilai kapasitansi yang aman apabila terjadi gangguan yang dapat menyebabkan feroresonansi serta karakterisasi feroresonansi yang terjadi berdasarkan plot diagram bifurkasi yang diperoleh

Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur dan pengumpulan data mengenai feroresonansi dan metode-metode yang umum digunakan dalam menganalisis feroresonansi. Setelah mengumpulkan data-data yang dibutuhkan maka selanjutnya adalah menentukan parameter-parameter dari rangkaian feroresonansi seperti nilai kapasitor, induktansi nonlinear dan nilai resistansi. Kemudian langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan rangkaian feroresonansi yang akan disimulasikan melalui perangkat lunak ATP Draw. Setelah melakukan pemodelan rangkaian yang akan

disimulasikan maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi rangkaian. Hasil dari simulasi berupa grafik fungsi tegangan terhadap waktu yang menunjukkan feroresonansi. Data-data grafik tersebut kemudian ditransfer dan diolah pada perangkat lunak MATLAB untuk menghasilkan diagram bifurkasi. Kemudian langkah terakhir yang dilakukan adalah hasil analisis digunakan sebagai rujukan menarik kesimpulan.

1.2 Sistematika Penulisan

Bab satu berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat dan relevansi dari penulisan.

Bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang sistem tenaga listrik terkhusus sistem transmisi tenaga listrik, transformator tegangan, serta CVT yang digunakan dalam studi ini.

Bab tiga membahas teori-teori dasar terkait fenomena feroresonansi pada sistem tenaga listrik serta metode analisa sensitivitas menggunakan diagram bifurkasi dua dimensi.

Bab empat berisi simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi berdasarkan parameter-parameter gangguan yang telah ditetapkan menggunakan *software* ATP Draw serta analisis sensitivitas berdasarkan diagram bifurkasi yang diperoleh melalui *software* MATLAB.

Bab lima berisi penarikan kesimpulan dari studi yang dilakukan melalui sebuah simulasi rangkaian feroresonansi dan saran untuk penelitian atau studi kedepannya.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 2

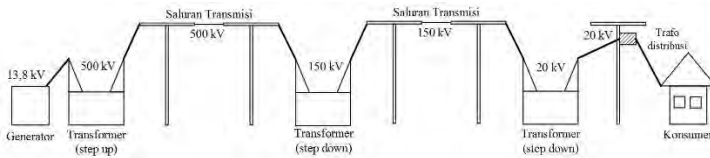
SISTEM TRANSMISI DAN TRANSFORMATOR TEGANGAN

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik masa kini mengalami kemajuan pesat seiring dengan perkembangan teknologi. Mulai dari mesin-mesin listrik yang digunakan sampai pada pemanfaatan komputasi cerdas dalam analisis sistem tenaga listrik. Secara umum sistem tenaga listrik memiliki 3 komponen utama yakni pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi dan sistem distribusi yang saling terikat dan sangat kompleks. Ada komponen yang tidak kalah penting pada sistem tenaga listrik yakni *substation* atau gardu induk (GI) yang berguna sebagai tempat untuk menaikkan dan menurunkan *level* tegangan dari suatu saluran. Mesin listrik yang berfungsi membangkitkan listrik biasanya terpusat dan lokasi antar pusat listrik berjauhan. Oleh karena itu listrik yang dibangkitkan akan disalurkan kepada konsumen melalui saluran transmisi dan saluran distribusi.

Skema sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 2.1 dimana listrik yang dihasilkan dari pembangkit tenaga listrik akan dinaikkan tegangannya melalui sebuah transformator dan dialirkan melalui saluran transmisi. Saluran transmisi menghubungkan pusat-pusat pembangkit listrik yang berbeda lokasi dan berletakan berjauhan. Melalui saluran transmisi, listrik akan menuju gardu induk sebagai tempat untuk menurunkan *level* tegangan listrik dan dialirkan melalui saluran distribusi. Dari saluran distribusi listrik akan mengalir ke rumah-rumah konsumen maupun industri dengan *level* tegangan yang lebih rendah.

Pada umumnya di Indonesia *level* tegangan yang digunakan untuk saluran transmisi adalah tegangan 500 kV dan 150 kV. Dan untuk tegangan distribusi menggunakan tegangan menengah yakni 20 kV. Sedangkan untuk saluran ke rumah tangga menggunakan tegangan 380/220 V.



Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik

2.2 Sistem Transmisi

Sistem transmisi merupakan tulang punggung dari sistem tenaga yang menghubungkan semua pusat-pusat pembangkit. Sistem transmisi berfungsi sebagai sarana untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit sampai sistem distribusi melalui sebuah media hantar yakni konduktor[10]. Konduktor yang digunakan bervariasi dan disesuaikan dengan kondisi lingkungan sistem transmisi. Listrik yang dialirkan melalui saluran transmisi merupakan tegangan *level* tinggi maupun ekstra tinggi (SUTT dan SUTET). Hal ini bertujuan mengecilkan rugi-rugi akibat adanya *drop voltage*. Persamaan 2.1 akan menjelaskan mengenai hubungan tegangan dan arus yang dimanfaatkan dalam sistem transmisi untuk tujuan menekan rugi-rugi daya yang timbul akibat *drop voltage*.

$$V = I \cdot Z \quad (2.1)$$

Dimana:

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Z = Impedansi (Ohm)

Apabila nilai tegangan dinaikkan dengan nilai hambatan yang tetap maka diperoleh nilai arus yang semakin kecil. Nilai arus (I) yang diperoleh menjadi lebih kecil akan mempengaruhi nilai rugi rugi daya pada sistem transmisi. Rugi-rugi daya dapat dilihat pada persamaan 2.2 berikut.

$$P = I^2 \cdot Z \quad (2.2)$$

Dimana:

P_{loss} = Rugi-rugi daya (Watt)

I = Arus (Ampere)

R = Impedansi (Ohm)

Nilai arus yang kecil diakibatkan penggunaan tegangan dengan *level* tinggi berdampak besar terhadap daya yang hilang pada saluran transmisi. Daya yang hilang akan semakin kecil dikarenakan arus yang timbul menjadi lebih kecil ketika penggunaan tegangan tinggi.

Suatu saluran transmisi tenaga listrik memiliki empat parameter yang mempengaruhi sistem kerja saluran transmisi tersebut, Keempat parameter tersebut adalah resistansi, induktansi, kapasitansi, dan konduktansi.

1. Resistansi

Resistansi kawat penghantar saluran transmisi sangat berpengaruh terhadap rugi-rugi daya (*power loss*). Resistansi pada suatu konduktor dapat dinyatakan dalam persamaan dibawah ini:

$$R_0 = \rho \frac{l}{A} \text{ Ohm} \quad (2.3)$$

Dimana:

ρ = Resistivitas penghantar (Ohm m)

l = Panjang (m)

A = Luas penampang (m^2)

Persamaan 2.3 digunakan untuk menghitung besarnya tahanan dari konduktor saluran. Tetapi pada kenyataanya kondisi diatas sangat sulit untuk diperoleh karena pada saat arus bolak-balik mengalir pada suatu konduktor, kepadatan arus tidak seragam di seluruh permukaan konduktor (*skin effect*)

2. Induktansi

Jika arus pada rangkaian berubah-ubah maka medan magnet yang ditimbulkan juga akan berubah-ubah dan apabila medan magnet yang ditimbulkan memiliki permeabilitas konstan, maka fluks gandeng berbanding lurus dengan arus sehingga tegangan imbasnya sebanding dengan kecepatan perubahan arus

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

Dimana:

L = Induktansi rangkaian (H)

e = Tegangan imbas (V)

$$\frac{di}{dt} = \text{Kecepatan perubahan arus (A/s)}$$

3. Kapasitansi

Kapasitansi saluran transmisi diartikan sebagai akibat adanya beda potensial antar penghantar maupun penghantar dengan permukaan tanah. Kapasitansi menyebabkan penghantar memiliki muatan apabila terjadi beda potensial diantaranya. Kapasitansi antara penghantar sejajar merupakan suatu nilai yang tergantung pada ukuran dan jarak pemisah antar penghantar. Untuk saluran transmisi yang panjangnya kurang dari 80 km, pengaruh kapasitansi sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Sedangkan untuk saluran menengah maupun panjang kapasitansinya bertambah tinggi sehingga dianggap terbagi rata sepanjang saluran atau tidak terpusat (*lumped*). Persamaan umum nilai kapasitansi antara kawat penghantar dengan tanah adalah sebagai berikut.

$$C = \frac{0,02413}{\log \frac{2h}{r}} \mu\text{F/km} \quad (2.5)$$

Dimana:

h = Jarak antara kawat penghantar dengan tanah (m)

r = Radius konduktor (cm)

4. Konduktansi

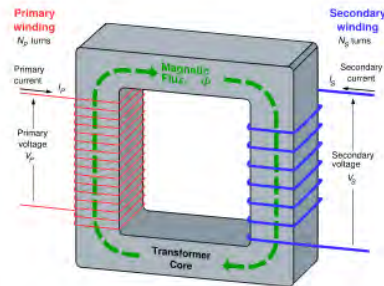
Konduktansi antar penghantar atau penghantar dengan tanah akan menyebabkan terjadinya arus bocor pada isolator-isolator dari udara melalui isolasi dan kabel. Karena kebocoran pada isolator saluran udara sangat kecil maka nilai konduktansi antar penghantar pada saluran dapat diabaikan. Salah satu alasan nilai konduktansi ini diabaikan adalah karena nilai ini selalu berubah-ubah berdasarkan kebocoran isolator.

2.3 Transformator Tegangan

Transformator merupakan peralatan yang mengubah daya listrik bolak-balik dari suatu *level* tegangan ke *level* tegangan bolak-balik lain dengan frekuensi yang sama melalui sebuah medan magnet. Sebuah transformator terdiri dari dua atau lebih belitan dan memiliki inti yang terbuat dari bahan yang bersifat feromagnetik. Belitan transformator pada umumnya terdiri dari belitan primer terhubung dengan sumber bolak-

balik dan belitan sekunder yang terhubung dengan beban seperti Gambar 2.2. Berdasarkan belitan intinya, transformator terdiri dari dua jenis yakni tipe inti dan tipe cangkang.

Transformator dalam sistem tenaga listrik merupakan komponen yang sangat penting karena digunakan pada setiap sub-sistem tenaga listrik seperti saluran transmisi, saluran distribusi dan pada gardu induk. Hal ini tidak terlepas dari fungsi transformator yang dapat memungkinkan pemilihan tegangan yang sesuai dengan keperluan tertentu. Transformator dapat digunakan pada gardu induk untuk menaikkan tegangan sehingga dapat ditransmisikan untuk jarak yang cukup jauh. Selain penggunaan dalam sistem tenaga transformator juga digunakan dalam dunia elektronika untuk peralatan listrik rumah tangga.



Gambar 2.2 Konstruksi transformator[11]

Penggunaan trafo pengukuran seperti *voltage transformer* pada suatu gardu induk sangat memungkinkan sistem mengalami feroresonansi yang ditimbulkan dari ketidaklinearan yang diperoleh dari inti trafo tegangan.

2.3.1 Prinsip Induksi pada Transformator

Prinsip kerja pada trafo menggunakan Hukum Faraday. Apabila medan magnet berubah-ubah terhadap waktu akibat arus bolak balik yang berbentuk sinusoidal, suatu medan listrik akan dibangkitkan atau diinduksikan. Besar GGL induksi yang dibangkitkan sebesar

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.6)$$

Dimana:

e = GGL induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan

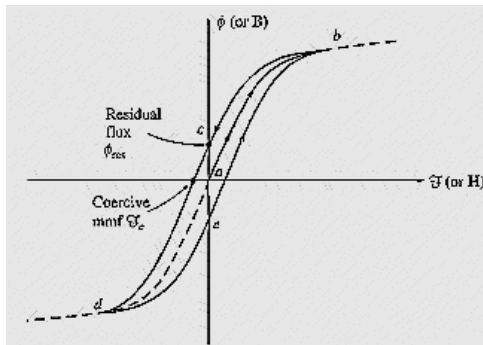
$d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Watt)

dt = Perubahan waktu (s)

Inti besi yang dikelilingi oleh belitan yang dialiri arus listrik akan menimbulkan sebuah medan magnet. Ketika magnet tersebut dikelilingi belitan maka akan timbul beda tegangan pada kedua ujung belitan tersebut.

2.3.2 Ketidaklinieran pada Inti Transformator

Fenomena histerisis pada trafo menunjukkan adanya ketidaklinieran pada inti transformator. Histerisis pada trafo biasanya digambarkan dalam bentuk kurva magnetisasi seperti pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Kurva histerisis[11]

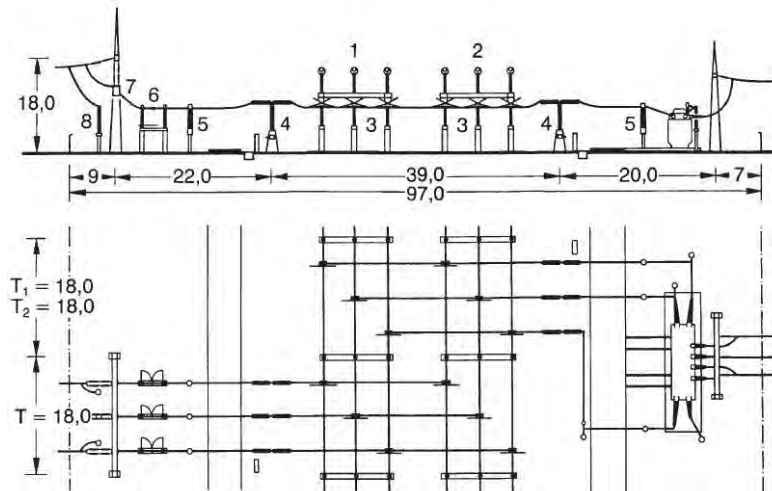
Pada Gambar 2.3 jalur a-b merupakan kondisi awal dari trafo saat diberikan arus. Kerapatan fluks akan naik terus hingga mencapai titik B_s yang merupakan titik saturasinya. Penurunan nilai arus berdampak pada penurunan fluks, tetapi tidak kembali mengikuti jalur awal melainkan melalui jalur bcd dikarenakan adanya fluks sisa. Untuk memaksa fluks mencapai nilai nol maka sejumlah *magnetomotive force* (*mmf*) dibutuhkan dan dikenal dengan istilah *coercive mmf*. Saat arus naik, fluks juga naik tetapi melalui jalur deb . Perbedaan jalur tersebut juga

diakibatkan oleh adanya fluks sisa. Ketika intensitas medan (H) sudah mencapai titik nol, kerapatan fluks (B) tidak mencapai titik nol melainkan masih terdapat fluks sisa. Fluks sisa tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas inti trafo. Sedangkan permeabilitas trafo dipengaruhi dari pemilihan bahan material inti trafo.

Semakin baik jenis material inti trafo yang digunakan maka kurva histeresis akan semakin kurus atau semakin cenderung linear. Dan begitu juga sebaliknya apabila material inti trafo yang digunakan kurang baik maka kurva histeris akan cenderung semakin lebar.

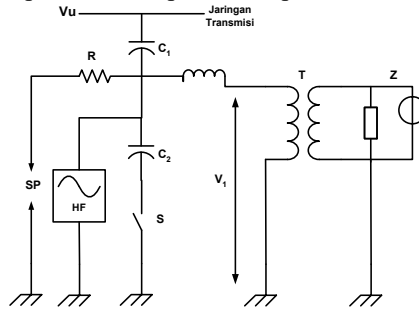
2.4 Capacitive Voltage Transformer (CVT)[7]

Capacitive Voltage Transformer (CVT) merupakan jenis transformator tegangan kapasitif yang biasanya digunakan pada saluran transmisi. Transformator jenis ini membutuhkan proteksi yang cepat dan tepat. Pada dasarnya transformator ini dikombinasikan dengan transformator tegangan induktif untuk meminimalkan tegangan yang masuk pada CVT, namun karena alasan ekonomis, transformator tegangan ini menggunakan kapasitor pembagi tegangan pada sisi primer.



Gambar 2.4 Layout tipikal gardu induk 500 kV: (1) busbar 1 (2) busbar 2 (3) busbar disconnector (4) circuit breaker (5) CT (6) feeder disconnector (7) line trap (8) CVT [15]

Transformator tegangan kapasitif ini juga digunakan sekaligus untuk keperluan pengukuran tegangan tinggi, pembawa sinyal komunikasi (*power line carrier*), dan kendali jarak jauh (*remote control*). Rangkaian pembagi kapasitif pada CVT dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen CVT[7]

CVT tidak menggunakan pembagi kapasitif sebagai elemen yang menurunkan tegangan sekunder ke suatu nilai standar, karena hal tersebut tidak ekonomis. Oleh karena itu digunakan elemen transformator magnetik. Tegangan yang terukur pada sisi tegangan tinggi berorde ratusan kilovolt. Oleh karena adanya pembagi kapasitor (C_1 dan C_2), tegangan yang terukur pada kapasitor C_2 atau tegangan primer transformator penengah diperoleh dalam orde puluhan kilovolt. Secara umum berada pada *range* 5, 10, 15, dan 20 kV. Berikutnya transformator magnetik akan menurunkan tegangan tersebut ke nilai yang standar (100 atau $100\sqrt{3}$ V).

Jika tegangan lebih terjadi pada saluran transmisi, tegangan pada kapasitor C_2 akan naik dan mampu merusak kapasitor tersebut. Oleh karena itu dipasang sela pelindung (SP) yang dihubungkan seri dengan resistor R untuk meredam arus pada saat sela pelindung bekerja. Pada sisi sekunder dipasang juga impedansi peredam (Z) untuk mencegah efek feroresonansi.

Jika rugi-rugi pada transformator diabaikan dan impedansi beban tidak terhingga, maka hubungan tegangan pada rangkaian tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan berikut.

$$\frac{V_u}{V_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = a_c \quad (2.7)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = a_t \quad (2.8)$$

$$\frac{V_u}{V_2} = a_c \times a_t = a_p \quad (2.9)$$

Dimana :

- a_c = faktor pembagi tegangan kapasitor
= 1,0 jika pembagi kapasitor tidak ada
- a_t = faktor transformasi transformator penengah
= 1,0 jika faktor penengah tidak ada
- a_p = faktor transformasi sistem pengukuran

Faktor pembagi dan faktor transformasi diatas akan berubah jika rugi-rugi magnetik dan impedansi beban diperhitungkan. Untuk mengkompensasi perubahan tersebut, maka transformator penengah dihubungkan dengan sebuah induktor L secara seri. Jika Z_b merupakan impedansi bersama transformator dan beban dilihat dari sisi tegangan tinggi, maka hubungan tegangan sumber dengan tegangan primer transformator penengah dapat dilihat melalui persamaan berikut.

$$\frac{V_u}{V_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} + \frac{1 - \omega^2 (C_1 + C_2)}{j\omega C_1 Z_b} \quad (2.10)$$

Harga L, C_1 , dan C_2 dipilih sedemikian rupa sehingga memenuhi hubungan dibawah ini.

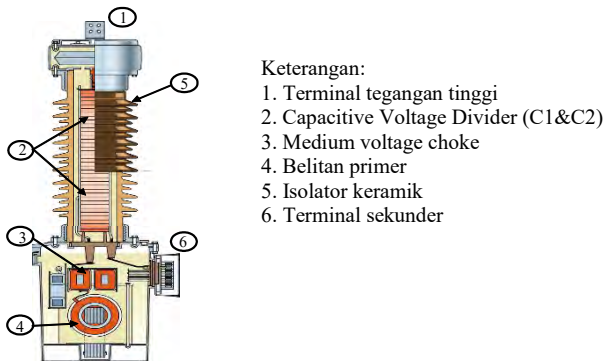
$$\omega^2 L (C_1 + C_2) = 1 \quad (2.11)$$

Dari persamaan diatas dapat dinyatakan bahwa perbandingan V_u dengan V_1 adalah tetap, seperti telah dinyatakan pada persamaan 2.11. Impedansi beban Z_b tidak mempengaruhi nilai faktor a_c .

2.4.1 Konstruksi CVT

Konstruksi CVT secara umum dibuat hanya dalam bentuk transformator kutub tunggal. Hal tersebut dikarenakan adanya rangkaian

pembagi kapasitif. Konstruksi transformator tegangan kapasitif tegangan tinggi dapat ditunjukkan melalui Gambar 2.6 berikut.

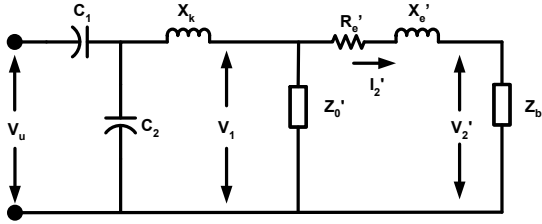


Gambar 2.6 Konstruksi CVT

Beberapa dielektrik berbentuk gulung dan berbahan kertas-minyak dihubungkan seri dan disusun dalam suatu kerangka porselen ramping. Belitan resonansi dan belitan magnetik ditempatkan di dalam bejana logam. Terminal K dapat dihubungkan langsung ke tanah atau dihubungkan dengan perangkat komunikasi dimana sinyal komunikasinya menumpang pada kawat jaringan. Agar bekerja secara maksimal dan efektif, maka besarnya kapasitansi hubungan seri C_1 dan C_2 harus memiliki nilai minimum 4400 pF.

2.4.2 Rangkaian Ekuivalen

CVT dapat dimodelkan menjadi rangkaian ekuivalen seperti dibawah ini.



Gambar 2.7 Rangkaian ekivalen CVT[7]

Nilai V_2' dapat dihitung apabila nilai V_u dan semua impedansi komponen pada rangkaian diketahui. Demikian pula V_2 dapat dihitung dengan persamaan impedansi dan tegangan pada sisi tegangan tinggi. Persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$Z_u' = a_t^2 Z_u \quad (2.12)$$

$$V_2' = a_t V_2$$

Dimana:

$$a_t = \text{faktor transformasi transformator} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Jika faktor transformasi sistem pengukuran adalah a_p (persamaan 2.9), rasio galat dari CVT adalah:

$$\gamma = \left| \frac{a_p - k_p}{k_p} \right| \times 100\% \quad (2.13)$$

k_p merupakan faktor transformasi tegangan aktual sistem pengukuran. Persamaan k_p adalah sebagai berikut.

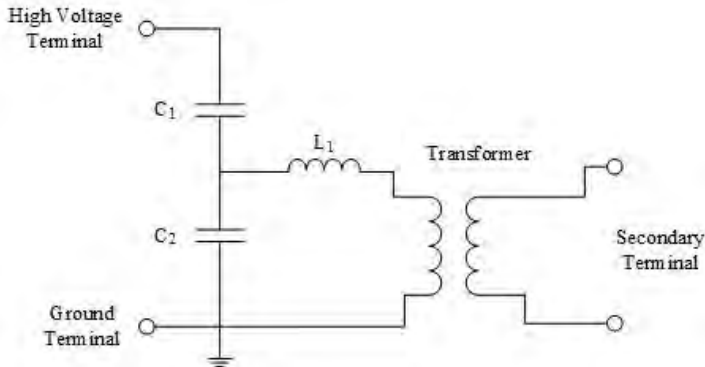
$$k_p = \frac{V_u}{V_2} \quad (2.14)$$

2.4.3 Komponen Utama CVT

Secara umum, CVT terdiri dari beberapa komponen utama berikut.

- a. Kapasitor kopling (C_1 dan C_2)

- b. *Compensating Reactor* (L)
- c. Transformator *step-down*
- d. Rangkaian penekan feroresonansi



Gambar 2.8 Komponen utama pada CVT[7]

Kapasitor kopling berfungsi sebagai pembagi tegangan, yakni menurunkan tegangan saluran ke *level* tegangan menengah (5 sampai 15 kV). *Compensating reactor* membatalkan reaktansi dari kapasitor kopling pada frekuensi sistem. Proses ini mencegah pergeseran fasa antara tegangan primer dan sekunder CVT pada frekuensi sistem. Selanjutnya tegangan tersebut diturunkan lagi ke *level* tegangan nominal rele, biasanya $115/\sqrt{3}$ V.

Compensating reactor dan transformator *step-down* pada CVT memiliki inti besi. Disamping rugi-rugi inti besi, fenomena yang dapat terjadi adalah feroresonansi (*ferroresonance*). Feroresonansi diakibatkan oleh sifat non-linier pada inti besi tersebut. Secara umum CVT dilengkapi oleh rangkaian peredam feroresonansi. Rangkaian ini digunakan untuk menghindari bahaya dan kerusakan akibat tegangan lebih karena feroresonansi, dan biasanya dipasang pada sisi sekunder transformator *step-down*.

BAB 3

FERORESONANSI DAN ANALISIS MENGUNAKAN DIAGRAM BIFURKASI

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang sangat kompleks terdiri dari komponen elektrik, mekanik, dan sistem kontrol. Kemajuan teknologi dan informasi, globalisasi industri, serta integrasi jaringan yang terus menerus berkembang saat ini berakibat pada sistem tenaga yang semakin rentan dan sensitif terhadap gangguan. Gangguan tersebut mungkin terjadi akibat aktivitas *switching* (*ON* dan *OFF*) dari suatu beban maupun komponen, atau energisasi dan re-energisasi komponen sistem untuk tujuan pemeliharaan, atau sambaran petir pada saluran transmisi. Oleh karena itu, sistem tenaga listrik tidak pernah beroperasi dalam kondisi *steady-state* secara terus menerus. Atau dengan kata lain terdapat dua keadaan pada sistem yakni keadaan normal dan transien. Namun durasi keadaan transien tidak terlalu signifikan dibanding dengan keadaan normal [12].

Peristiwa transien dapat dipengaruhi oleh parameter-parameter pada sistem seperti saluran transmisi, transformator, kabel, kapasitansi shunt, dan sebagainya. Berdasarkan rentang frekuensinya, transien dibedakan menjadi transien frekuensi tinggi dan transien frekuensi rendah. Salah satu contoh transien frekuensi rendah adalah feroresonansi. Feroresonansi merupakan resonansi yang terjadi antara parameter sistem seperti elemen kapasitif dengan material ferromagnetik pada suatu peralatan.

3.1 Resonansi

Resonansi listrik merupakan teori dasar yang digunakan untuk memahami peristiwa feroresonansi. Resonansi listrik adalah gejala kelistrikan yang terjadi pada suatu rangkaian arus bolak-balik yang mengandung elemen induktor (L), dan kapasitor (C). Resonansi ini dapat dijumpai pada sistem tenaga listrik di semua level tegangan sistem tenaga listrik. Resonansi terbagi menjadi dua tipe yakni resonansi seri dan resonansi paralel. Resonansi seri terjadi dalam rangkaian seri sedangkan resonansi paralel terjadi pada rangkaian paralel.

Resonansi seri merupakan rangkaian listrik dengan komponen induktor dan kapasitor yang tersusun seri ketika frekuensi sumber diubah-

ubah, maka akan terjadi resonansi dimana nilai reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif.

$$X_L = X_C \quad (3.1)$$

Dimana:

X_L = Reaktansi Induktif

X_C = Reaktansi Kapasitif

Sehingga syarat untuk terjadinya sebuah resonansi adalah seperti persamaan berikut:

$$LC\omega^2 n \quad (3.2)$$

Dimana:

L = induktansi (Henry)

C = kapasitansi (Farad)

ω_n = kecepatan sudut (Rad/s)

Sehingga ketika resonansi terjadi maka nilai impedansi rangkaian akan berubah dimana dalam persamaan ditulis:

$$Z = R \quad (3.3)$$

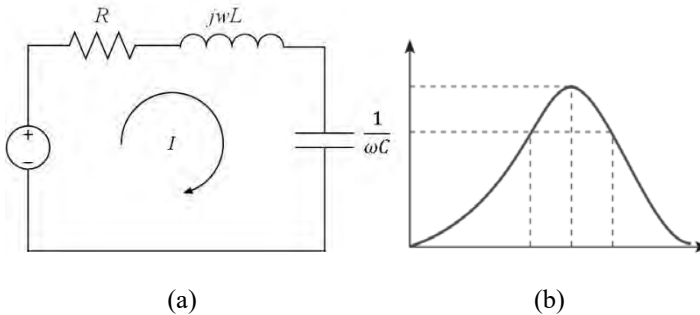
Dimana:

Z = Impedansi

R = Resistansi

X = Reaktansi

Sehingga ketika resonansi terjadi frekuensi sumber menjadi frekuensi resonansi maka nilai reaktansi akan menjadi nol. Nilai reaktansi sama dengan nol menyebabkan nilai impedansi mencapai nilai yang minimum. Ketika nilai impedansi menjadi minimum maka nilai arus (I) akan mencapai maksimum. Gambar rangkaian rangkaian resonansi seri dan kurva hasil simulasi resonansi dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Resonansi seri (a) Rangkaian resonansi seri (b) Hubungan Arus dan Frekuensi resonansi

3.2 Feroresonansi

3.2.1 Pengertian Feroresonansi

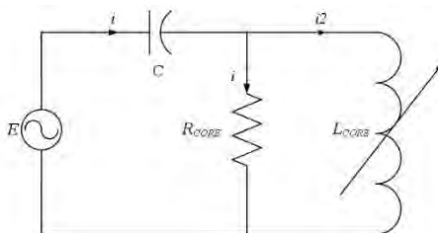
Feroresonansi atau resonansi non-linier merupakan fenomena kelistrikan komplek nonlinear yang dapat mengakibatkan tegangan lebih pada sistem tenaga sehingga membahayakan sistem transmisi, sistem proteksi, peralatan listrik maupun operator[9]. Apabila terdapat gangguan pada sistem dan tidak dapat dijelaskan secara spesifik jenis gangguannya, kemungkinan hal tersebut merupakan gejala dari feroresonansi.

Istilah feroresonansi mengacu pada fenomena osilasi yang muncul pada sebuah rangkaian listrik yang mengandung elemen induktansi nonlinier, kapasitor dan sumber tegangan sinusoidal, dan rugi-rugi yang rendah. Induktansi nonlinear diperoleh dari penggunaan trafo daya, trafo induktif pengukur tegangan, reaktor *shunt* pada sistem tenaga listrik. Sedangkan kapasitor diperoleh dari kapasitor bank, kabel, proses *switching* dan trafo tegangan kapasitif.

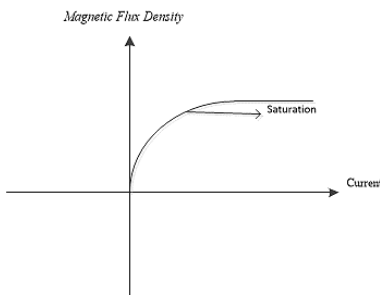
3.2.2 Penyebab Timbulnya Feroresonansi

Rangkaian resonansi seri sering digunakan sebagai pendekatan terhadap fenomena feroresonansi agar lebih mudah dipahami. Pada rangkaian resonansi penggunaan induktor diganti menjadi induktor nonlinear sebagai pemodelan dari inti trafo sehingga rangkaiannya berubah menjadi rangkaian feroresonansi. Sama halnya dengan resonansi

pada rangkaian resonansi seri, fenomena yang terjadi pada rangkaian feroresonansi juga menimbulkan kenaikan arus yang sangat besar dikarenakan impedansi rangkaian yang kecil. Arus yang naik menyebabkan rapat fluks juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi menjadi linear. Ketika nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat (menjadi nonlinear). Sehingga ketika terjadi interaksi antara kapasitor dan inti besi induktor akan menghasilkan tegangan dan arus yang tidak biasa. Hal ini akan sangat berbahaya bagi sistem dan peralatan listrik. Gambar rangkaian feroresonansi dengan induktor menggunakan induktor nonlinear dapat dilihat pada Gambar 3.2. Kurva saturasi dari induktor nonlinear terdapat pada Gambar 3.3



Gambar 3.2 Rangkaian pemodelan feroresonansi



Gambar 3.3 Kurva saturasi induktor non-linier[13]

Timbulnya feroresonansi pada sebuah sistem tenaga listrik harus memenuhi tiga hal penting yakni induktansi nonlinear, elemen kapasitif dan sumber AC. Elemen yang digunakan untuk menimbulkan ketidaklinieran induktansi adalah bahan feromagnetik yang digunakan sebagai material inti trafo. Sehingga untuk fenomena feroresonansi trafo

mendapatkan perhatian khusus. Hal tersebut dikarenakan induktansi nonlinear dihasilkan dari inti trafo yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi.

3.2.3 Gejala-gejala Feroresonansi

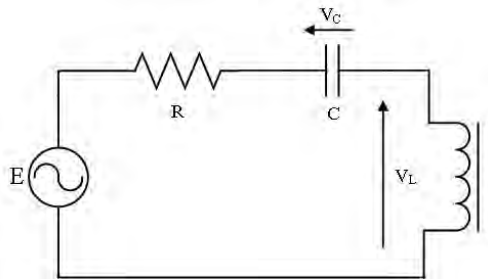
Feroresonansi pada sebuah sistem tenaga ditandai dengan munculnya lebih dari satu respon *steady state* pada parameter jaringan yang sama [4]. Respon yang berubah secara tiba-tiba dari suatu respon *steady state* normal, menjadi respon *steady state* feroresonansi (ditandai dengan *level* harmonisa dan tegangan lebih yang tinggi) yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik. Gejala-gejala kelistrikan seperti pengisiran daya trafo, *lightning overvoltage*, gejala transien dapat memungkinkan munculnya feroresonansi.

Beberapa gejala yang timbul yang menunjukkan kehadiran feroresonansi pada sistem tenaga listrik antara lain :

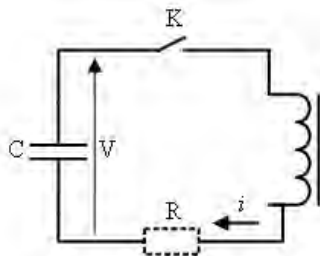
1. Penyimpangan yang besar untuk nilai tegangan lebih dan arus lebih (*High sustained overvoltage and overcurrent*).
2. Pemanasan berlebih dan suara bising pada trasformator (*Transformer overheating and loud noise*).
3. Kerusakan peralatan listrik (*Electrical equipment damage*).

3.2.4 Pendekatan Fisik Feroresonansi

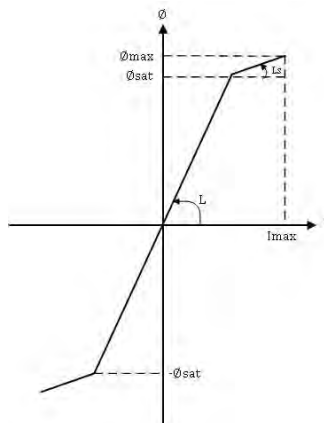
Rangkaian feroresonansi sederhana terdiri dari elemen kapasitor dan induktansi nonlinear. Elemen tersebut merupakan pemodelan dari sifat sifat kapasitif dan induktif yang diperoleh dari penggunaan peraltan listrik dalam sistem tenaga listrik. Nilai resistansi dari resistor dianggap sangat kecil. Seperti pada Gambar 3.4 yang menunjukkan karakteristik dasar feroresonansi



Gambar 3.4 Rangkaian karakteristik dasar feroresonansi

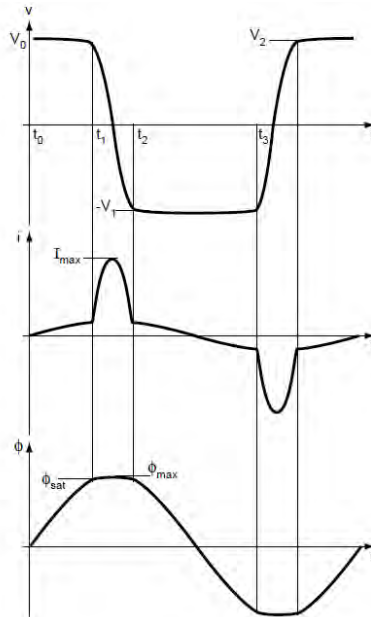


Gambar 3.5 Diagram skematik model feroresonansi



Gambar 3.6 Grafik hubungan fluks dan arus

Bentuk gelombang yang merupakan tipikal dari feroresonansi terdapat pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Osilasi pada rangkaian feroresonansi seri[10]

Peristiwa osilasi pada rangkaian feroresonansi seri dijelaskan berdasarkan urutan waktu seperti berikut :

1. Sesaat t_0 , saklar K ditutup maka arus I terbentuk, dan berosilasi pada bentuk getaran dengan persamaan:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

Hubungan fluks pada kumparan dengan tegangan V pada kapasitor dapat dituliskan dengan rumus:

$$\theta = \left(\frac{V_0}{\omega_1}\right) \sin \omega_1 t; v = V_0 \cos \omega_1 t \quad (3.5)$$

2. Jika $V_0/\omega > \theta_{sat}$ pada akhir t_1 , fluks akan mencapai saturasi menjadi θ_{sat} dan tegangan V sama dengan V_1 . L_s merupakan nilai induktansi kumparan yang telah mengalami saturasi. Dikarenakan L_s memiliki nilai yang sangat kecil dibandingkan L , maka kapasitor akan *discharge* secara mendadak melewati kumparan dalam bentuk persamaan osilasi:

$$\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C} \quad (3.6)$$

Arus dan fluks mencapai puncak ketika energi elektromagnetik tersimpan pada kumparan, ekivalen dengan energi yang tersimpan pada kapasitor $\frac{1}{2} CV^2$

3. Pada saat t_2 , fluks kembali menjadi θ_{sat} . Induktansi diasumsikan dengan nilai L , tegangan dengan nilai v dan terbalik sehingga bernilai $-V_2$.
4. Pada saat t_3 , fluks mencapai $-\theta_{sat}$ dan tegangan bernilai $-V_2$. Pada kondisi sebenarnya nilai ω_1 sangat kecil sehingga dapat diasumsikan bahwa $V_1 \approx V_2 \approx V_0$

Periode T dari osilasi berpengaruh terhadap nilai $2\pi\sqrt{LC}$ pada kondisi tidak saturasi, sedangkan pada kondisi saturasi nilainya menjadi $2\pi\sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$ dimana $t_3 - t_2 \approx 2\theta_{sat}/V_0$

Persamaan frekuensi untuk kedua kondisi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (3.7)$$

Frekuensi inisial tersebut bergantung pada θ_{sat} dalam kondisi tidak linier dan tegangan inisial V_0 . Pada kenyataannya kondisi tersebut sangat sulit diperoleh karena adanya rugi-rugi $I^2 R$ pada resistor R

sehingga tegangan V akan menurun ($V_2 < V_1 < V_0$). Hal tersebut dikarenakan terdapat perbedaan fluks selama periode non-saturasi ($t_3 - t_2$) dan menimbulkan penurunan tegangan. Penurunan tegangan berakibat pada penurunan frekuensi.

Tabel 3.1 Perbandingan antara resonansi linier dengan feroresonansi

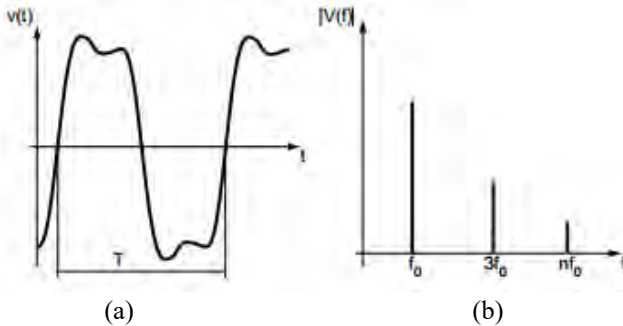
Rangkaian	Parameter Sistem	Resonansi	Respon
Linier	Resistansi, kapasitansi, induktansi	Resonansi terjadi pada satu frekuensi, sesuai dengan frekuensi sumber	Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada satu keadaan steady-state
Non-linier	Resistansi, kapasitansi, induktansi non-linier (material feromagnetik)	Feroresonansi terjadi pada frekuensi tertentu, ketika induktansi non-linier sesuai dengan kapasitansi sistem	Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada beberapa keadaan steady-state

3.2.5 Klasifikasi Feroresonansi[12]

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan bahwa resonansi linier digunakan sebagai pendekatan untuk memahami peristiwa feroresonansi. Elemen-elemen yang sangat berpengaruh dalam rangkaian feroresonansi adalah resistansi, kapasitansi dan induktansi non-linier. Dalam dunia sistem tenaga listrik, feroresonansi sering terjadi diakibatkan oleh operasi *switching*. Setelah suatu operasi *switching* terjadi akan muncul transien tegangan lebih inisial dan akan diikuti oleh transien berikutnya dimana sistem bisa memiliki lebih dari satu keadaan *steady-state*. Dikarenakan adanya elemen non-linier pada rangkaian feroresonansi, maka bisa muncul beberapa respon *steady-state* dari feroresonansi secara acak. Secara mendasar ada empat tipe respon *steady-state* dari suatu rangkaian feroresonansi. Keempat klasifikasi tersebut adalah sebagai berikut.

a. Fundamental Mode

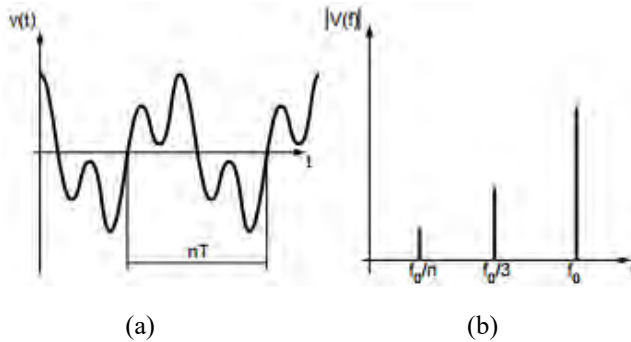
Fundamental mode memiliki respon periodeik tegangan dan arus yang sama dengan sistem. Spektrum sinyal terdiri atas frekuensi fundamental sistem sebagai respon yang dominan dan diikuti oleh harmonisa ke- 3, 5, 7, dan n harmonisa ganjil.



Gambar 3.8 *Fundamental mode* (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal

b. Subharmonic Mode

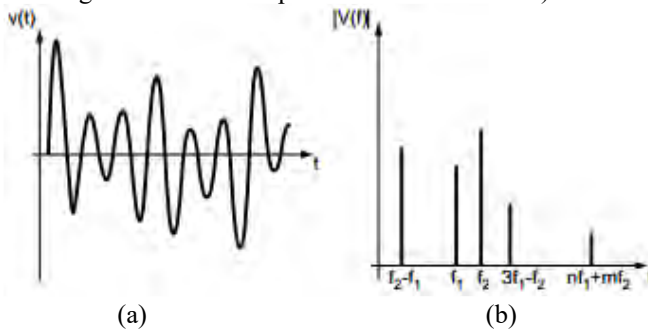
Sinyal feroresonansi tipe ini memiliki periode kelipatan nT dari periode sumbernya. *Fundamental mode* dari suatu feroresonansi biasanya dituliskan dengan feroresonansi periode-1 ($f_0/1$ Hz) dan feroresonansi dengan periode sub-kelipatan dari frekuensi sistem disebut feroresonansi periode-n (f_0/n Hz). f_0 menandakan frekuensi fundamental dan n adalah sebuah integer.



Gambar 3.9 *Subharmonic mode* (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal

c. Quasi-periodic Mode

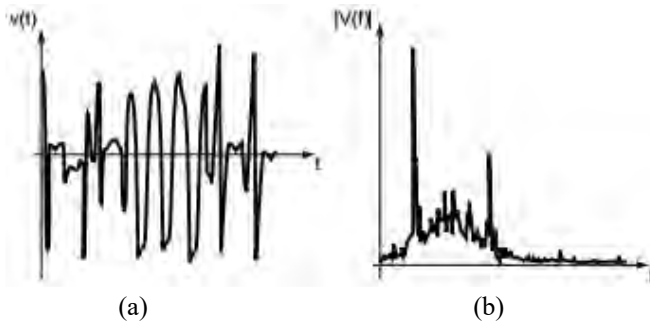
Sinyal feroresonansi jenis ini tidak periodik. Spektrum sinyalnya merupakan diskontinyu, didefinisikan sebagai $nf_1 + mf_2$ (n dan m adalah integer dan f_1/f_2 merupakan nilai riil irrasional)



Gambar 3.10 *Quasi-periodic mode* (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal

d. Chaotic Mode

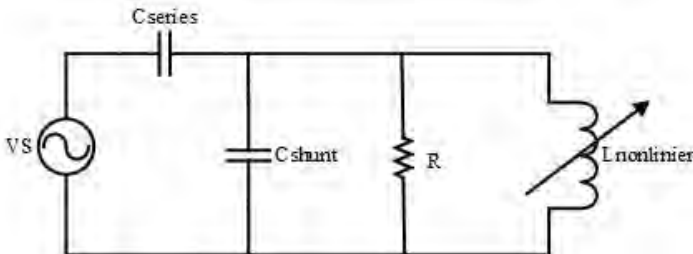
Feroresonansi jenis ini memiliki spektrum sinyal non-periodik dan kontinyu. Sinyal ini tidak dapat diinterupsi oleh frekuensi apapun dan berbentuk tidak teratur (*chaos*).



Gambar 3.11 *Chaotic mode* (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal

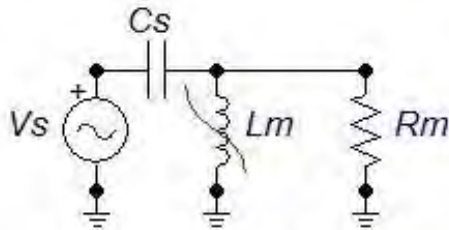
3.3 Simulasi Feroresonansi

Feroresonansi pada sistem tenaga dapat dipahami melalui sebuah pemodelan rangkaian simulasi. Gambar 3.11 merupakan rangkaian ekuivalen dari suatu rangkaian feroresonansi yang kompleks.



Gambar 3.12 Rangkaian ekuivalen feroresonansi reduksi

Pada studi ini feroresonansi yang disimulasikan terjadi pada perangkat *Capacitive Voltage Transformer* (CVT). Parameter-parameter gangguan yang dipelajari dalam studi ini yakni impuls petir dan operasi *switching* oleh *circuit breaker* (CB). Rangkaian ekuivalen feroresonansi diatas dapat dimodelkan menjadi suatu pemodelan feroresonansi menggunakan software ATPDraw seperti pada Gambar 3.13. Rangkaian pemodelan (Gambar 3.13) tersebut terdiri dari sumber tegangan AC, kapasitor seri (C_s), resistansi R_m , dan induktor non-linier L_m sebagai ciri khas dari rangkaian feroresonansi.

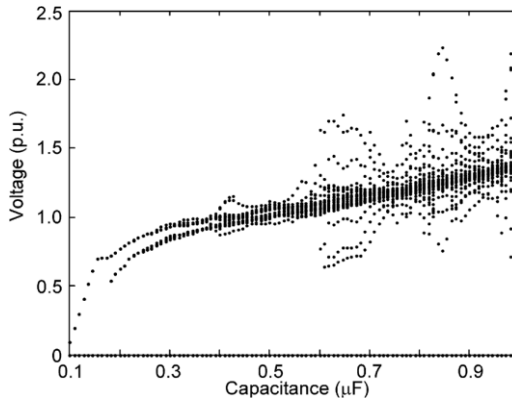


Gambar 3.13 Pemodelan rangkaian ferresonansi menggunakan ATP Draw[6]

3.4 Diagram Bifurkasi

Suatu sistem tenaga listrik yang bergantung pada parameter tertentu yang tidak diketahui besarnya, dinamika sistem tersebut sangat dipengaruhi oleh perubahan nilai parameternya. Atau dengan kata lain, kondisi stabil dari suatu sistem dapat berubah menjadi tidak stabil jika nilai parameternya berubah. Perubahan kestabilan ataupun perubahan yang signifikan dalam dinamika suatu sistem akibat perubahan nilai parameter dari sistem itu disebut bifurkasi. Bifurkasi tidak selalu berkaitan dengan kekompleksan. Tetapi ada bifurkasi yang selalu terkait dengan bertambahnya kerumitan sistem yang pada akhirnya mengakibatkan *chaos*[6].

Diagram bifurkasi merupakan diagram yang berisi rekaman atau plotting besaran pada suatu sistem di daerah mana yang mengalami perubahan secara mendadak/ tiba-tiba. Kondisi tersebut diperoleh dengan menguji sistem pada keadaan *steady-state* sementara satu atau lebih parameter sistem diubah. Atau dengan kata lain, diagram bifurkasi merupakan suatu plot yang menunjukkan karakteristik *steady-state* suatu sistem dalam range perubahan parameter sistem tertentu. Gambar 3.13 merupakan salah satu contoh diagram bifurkasi fungsi kapasitansi seri pada rangkaian pemodelan ferresonansi.



Gambar 3.14 Diagram bifurkasi fungsi kapasitansi seri[9]

Analisis Feroresonansi Menggunakan Diagram Bifurkasi

Analisis dan desain sistem tenaga listrik saat ini sangat mengandalkan *software-software* komputasi. Kemajuan *software* dan *hardware* masa kini mampu meningkatkan akurasi representasi *virtual* dari sebuah sistem tenaga listrik yang sangat kompleks.

Simulasi dan analisis kasus-kasus transien pada sistem tenaga listrik juga digunakan untuk berbagai tujuan seperti penentuan *rating* peralatan-peralatan yang ada di dalamnya seperti kemampuan isolasi, desain dan optimasi sistem, pengujian sistem proteksi, atau analisis sistem tenaga untuk bermacam-macam kondisi operasi. Disamping itu, kombinasi dua atau lebih *software* komputasi juga sering digunakan untuk analisis yang lebih mendalam. Pada studi ini digunakan kombinasi antara ATP Draw dan MATLAB, dimana ATP Draw digunakan untuk analisis parameter rangkaian dan MATLAB untuk memproses sinyal transien dan di-*plot* dalam bentuk diagram bifurkasi.

Berikut ini bagan yang berisi urutan-urutan plot diagram bifurkasi.

ATPDraw

- Pemodelan rangkaian feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan impuls petir dan operasi *switching*.
- Memilih parameter-parameter yang akan divariasikan serta menentukan batas atau range nilai yang akan disimulasikan.
- *Running* ATP Draw dan plot hasilnya untuk masing-masing nilai parameter.



MATLAB

- Mengkonversikan setiap plot ke dalam format “.mat”
- Mencari nilai puncak dari masing-masing plot untuk setiap *cycle* 50 Hz.
- Plotting diagram bifurkasi dengan sumbu-X adalah susunan nilai parameter yang divariasikan dan sumbu-Y adalah nilai-nilai puncak yang telah ditentukan.

Gambar 3.15 Langkah-langkah plotting diagram bifurkasi pada MATLAB[6]

Bagan diatas merupakan langkah-langkah untuk membentuk diagram bifurkasi dua dimensi (2-D). Diagram bifurkasi 2-D merupakan alternatif lain untuk melakukan analisis parametrik selain menggunakan ATP Draw serta mengetahui respon sistem dalam analisis feroresonansi.

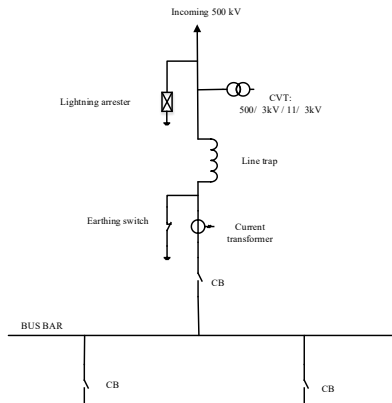
---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 4

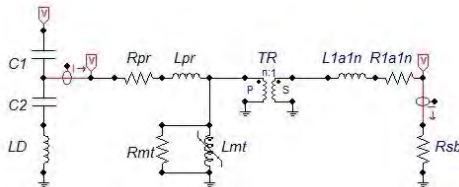
ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI MENGUNAKAN DIAGRAM BIFURKASI

Fenomena feroresonansi yang sering terjadi pada sistem tenaga sangat sulit untuk diprediksi. Oleh karena itu sangat perlu dilakukan simulasi-simulasi untuk beberapa parameter gangguan untuk mengetahui apakah gejala-gejala yang terjadi masih berada pada batas aman atau tidak.

Pada studi ini, objek yang diamati dimana peristiwa feroresonansi terjadi adalah peralatan CVT pada incoming gardu induk 500 kV (Gambar 4.1). Gambar 4.2 merupakan pemodelan CVT pada ATPDraw.



Gambar 4.1 *Single line diagram* incoming gardu induk 500kV



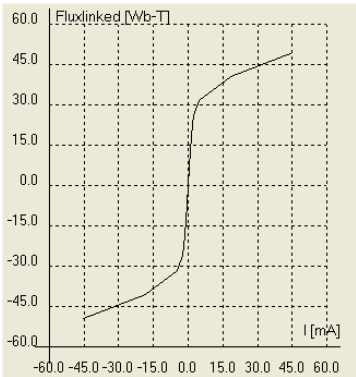
Gambar 4.2 Pemodelan CVT pada ATPDraw

Model CVT yang digunakan dalam simulasi ini diambil dari referensi yang ada dan memiliki nilai-nilai parameter yang tetap sebagai berikut.

Tabel 4.1 Nilai-nilai parameter CVT[2]

Parameter	Nilai
Kapasitor C ₁	3300 pF
Kapasitor C ₂	79700 pF
Resistansi primer (R _{pr})	220 Ω
Induktansi primer (L _{pr})	1,745 H
Resistansi sekunder (R _{1a1n})	0,04 Ω
Induktansi sekunder (L _{1a1n})	0,007 mH
Resistansi burden	75 Ω
R _{magnetisasi} (R _{mt})	6500000 Ω
Load Coil (L _D)	10 mH
V _{primer} /V _{Sekunder}	20/ √3 kV/ 100/ √3 V

Pada rangkaian pemodelan CVT diatas digunakan parameter kapasitor pembagi C₁ dan C₂ sebesar 3300 pF dan 79700 pF. Sehingga tegangan yang masuk pada sisi primer trafo TR adalah 10,58 kV. Perbandingan belitan primer dan sekunder trafo TR adalah 78,74 sehingga tegangan sekunder yang diperoleh adalah 136,4 V. Kurva magnetisasi trafo dapat dilihat pada Gambar 4.3 dibawah ini.

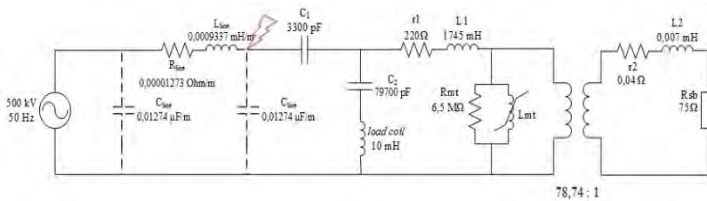


Gambar 4.3 Kurva Magnetisasi Trafo *Step-Down*[8]

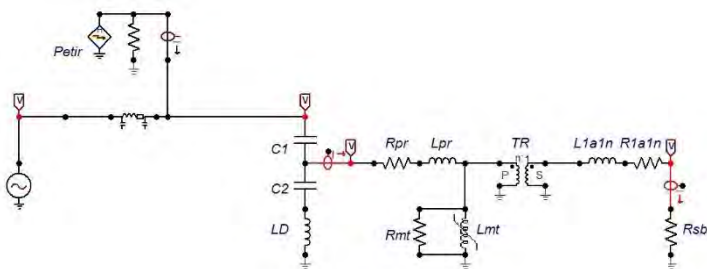
Pada bab sebelumnya telah dijelaskan bahwa penyebab-penyebab terjadinya feroresonansi tidak jelas dan gejalanya sangat sulit untuk diprediksi. Oleh karena itu pada studi ini parameter gangguan yang diperhitungkan dibatasi pada gangguan impuls petir, gangguan *switching* CB, dan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

4.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi dan Simulasi pada ATPDraw

Simulasi feroresonansi pada studi ini didasarkan pada tiga macam parameter gangguan yang mampu memicu terjadinya feroresonansi. Pertama, gangguan impuls petir yang terjadi pada saluran transmisi yang terhubung dengan CVT. Kedua, gangguan akibat operasi *switching* pemutus daya. Ketiga, gangguan hubung singkat antara fasa dengan tanah.



Gambar 4.4 Rangkaian ekivalen feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan impuls petir



Gambar 4.5 Pemodelan rangkaian feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan impuls petir

Rangkaian ekivalen feroresonansi yang terjadi di CVT dengan parameter gangguan impuls petir dapat dilihat pada Gambar 4.4. Sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan bolak-balik (AC) rms *line-line* ($V_{L-L-rms}$) 500 kV, 50 Hz. Dikarenakan objek yang diteliti merupakan satu fasa, tegangan *line-netral* ($V_{L-netral}$) adalah:

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

$$V_{L-Nrms} = \frac{500000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 288675 \text{ V}$$

Tegangan puncak *line-netral* ($V_{peakL-netral}$) dapat dihitung menjadi:

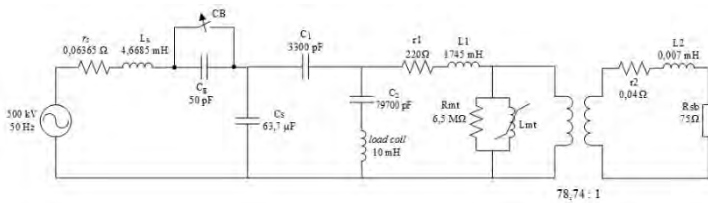
$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$

$$V_{L-Npeak} = 288675 \times \sqrt{2} = 408248 \text{ V}$$

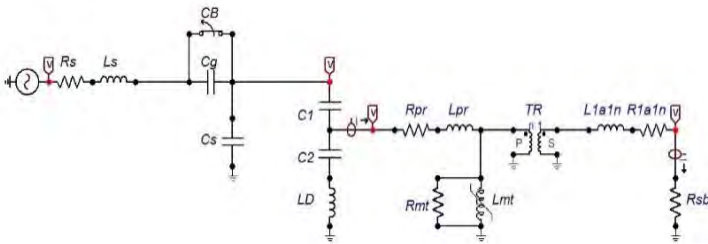
Untuk kasus gangguan impuls petir digunakan model saluran transmisi tipe pi yang memiliki komponen utama berupa komponen resistif, kapasitif, dan induktif. Pada ATP Draw dipilih model saluran *Lumped RLC-Pi 1 phase* dengan parameter sebagai berikut, panjang saluran diasumsikan 5 km, resistansi saluran 0,00001273 Ohm/m, induktansi saluran 0,0009337 mH/m, dan kapasitansi saluran sebesar 0,01274 μ F/m. Nilai kapasitansi saluran ini akan divariasikan dalam rentang nilai 0,001 – 10 μ F untuk analisis parametrik dan sensitivitas sistem terhadap perubahan nilai kapasitansi saluran yang dapat menimbulkan feroresonansi. Analisis ini akan dibahas pada bagian berikutnya.

Impuls petir pada simulasi ini dimodelkan dalam bentuk sumber arus impuls yang diberikan pada saluran transmisi. Arus impuls petir memiliki bentuk umum 1,2/50 μ s dan amplitudo 10 kA.

Parameter gangguan kedua yang dibahas dalam studi ini adalah operasi switching sebuah *circuit breaker*. Pada simulasi ini dibuat sebuah model rangkaian feroresonansi ketika sebuah *circuit breaker* bekerja saat terjadi gangguan pada sisi primer CVT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Pemodelan rangkaian feroresonansi pada ATP Draw dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Rangkaian ekivalen feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan *switching* CB



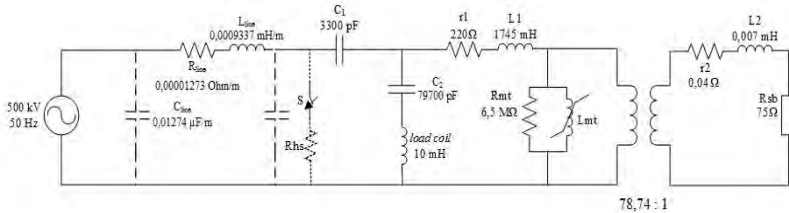
Gambar 4.7 Representasi rangkaian feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan *switching*

Sumber tegangan yang digunakan dalam simulasi ini sama dengan simulasi dengan parameter gangguan impuls petir yakni 500 kV_{L-Lrms} 50 Hz. Nilai-nilai parameter CVT juga sama seperti rangkaian simulasi sebelumnya. Dari rangkaian ekivalen (Gambar 4.6) diatas dapat dilihat bahwa terdapat elemen C_g dan C_s . C_g dan C_s dalam kondisi *existing* bernilai 50 pF dan 63,7 μ F. C_g merupakan suatu nilai kapasitif yang muncul akibat pemutusan daya oleh *circuit breaker* (CB). Sedangkan C_s merupakan representasi kapasitansi *shunt* yang diperoleh dari nilai kapasitif saluran transmisi. Operasi *switching* pada simulasi ini dimodelkan dengan sebuah CB yang terbuka pada waktu 0,2 detik.

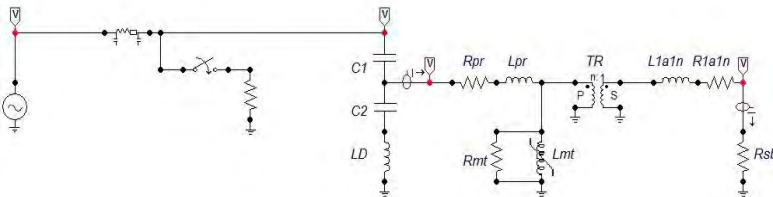
Pada studi ini, nilai C_g dan C_s divariasikan pada rentang nilai 0,001 – 10 μ F. Tujuan mengubah-ubah kedua parameter ini ialah menganalisis sensitivitas sistem terhadap perubahan nilai-nilai kapasitansi yang mampu memicu terjadinya feroresonansi.

Parameter gangguan ketiga yang dibahas dalam studi adalah hubung singkat satu fasa ke tanah. Secara teknis gangguan ini sangat

sering terjadi pada sistem transmisi tenaga listrik. Salah satu penyebab terjadinya adalah degradasi atau bahkan kegagalan isolator antara kawat fasa dengan tiang transmisi.



Gambar 4.8 Rangkaian ekivalen feroresonansi pada CVT akibat hubung singkat fasa ke tanah



Gambar 4.9 Pemodelan rangkaian feroresonansi pada CVT dengan parameter gangguan hubung singkat fasa ke tanah

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa kejadian hubung singkat direpresentasikan oleh saklar S yang menutup pada waktu tertentu dan terhubung dengan sebuah impedansi R_{sh} . Pada simulasi ini model *Lumped RLC-Pi 1 phase* digunakan sebagai pemodelan saluran transmisi dimana nilai kapasitansi saluran divariasikan pada nilai tertentu.

4.2 Simulasi dan Analisis Menggunakan ATPDraw

Analisis yang digunakan dalam studi ini terbagi menjadi dua, yakni analisis parametrik dan analisis sensitivitas. Analisis parametrik didasarkan pada penentuan parameter-parameter *existing* pada rangkaian feroresonansi dan plot tegangan pada sisi primer transformator step down menggunakan *software* ATP Draw. Sedangkan analisis sensitivitas didasarkan pada perubahan nilai-nilai kapasitansi pada sistem dan plot diagram bifurkasi.

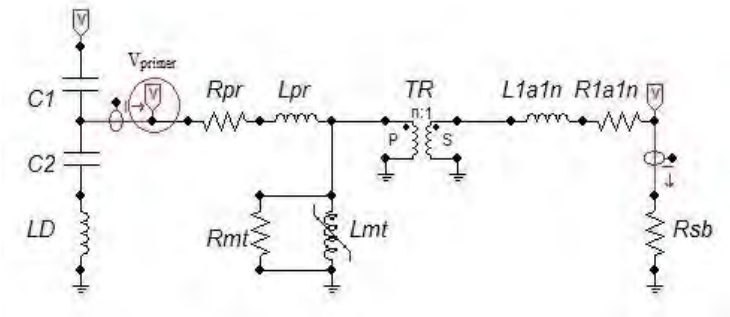
4.2.1 Keadaan Normal

Dalam keadaan normal, hasil pengukuran tegangan input CVT merupakan tegangan kapasitor pembagi pada sisi primer CVT yang memiliki tegangan *line-neutral rms* (V_{L-Nrms}) 11 kV. Hasil perhitungan yang diperoleh adalah:

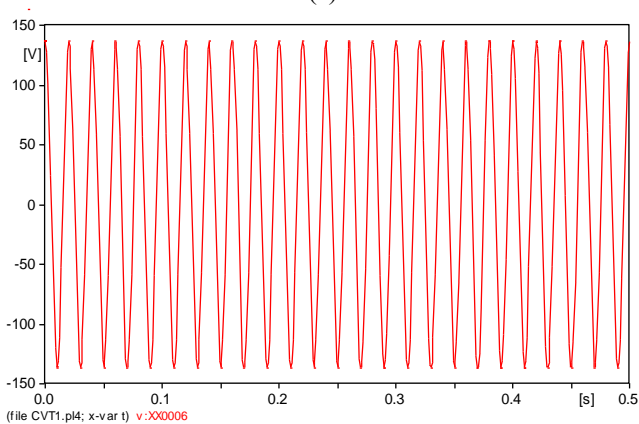
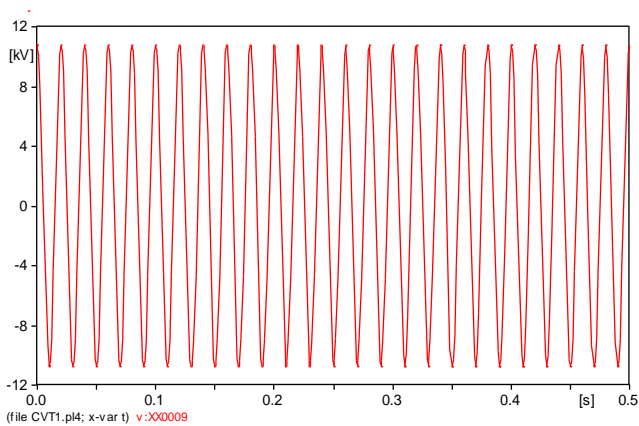
$$\frac{V_{\text{sistem}(L-Nrms)}}{V_{\text{inCVT}(L-Nrms)}} = \frac{C1+C2}{C1}$$

$$V_{\text{inCVT}(L-Nrms)} = \frac{C1}{C1+C2} \times V_{\text{sistem}(L-Nrms)} \quad (4.3)$$

$$V_{\text{inCVT}(L-Nrms)} = \frac{3300 \mu\text{F}}{3300 \mu\text{F} + 79700 \mu\text{F}} \times 288675 \text{ V} = 11,47 \text{ kV}$$



Gambar 4.10 Tegangan primer CVT (V_{primer})

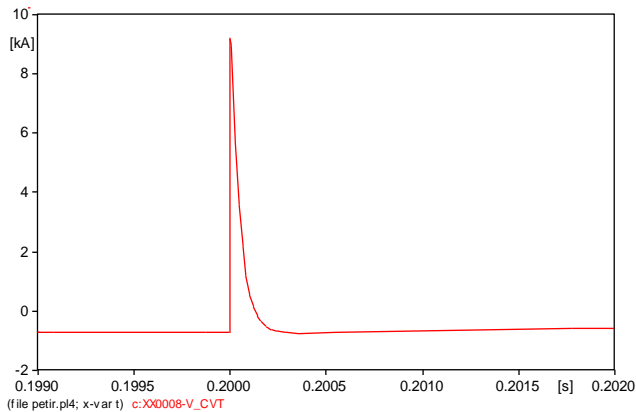


Gambar 4.11 Plot tegangan CVT dalam keadaan normal (a) sisi primer (b) sisi sekunder

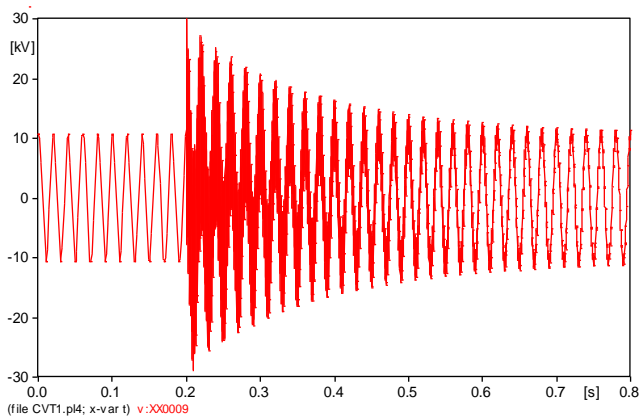
Hasil pengukuran dan perhitungan memiliki nilai yang sama. Perhitungan diatas menunjukkan bahwa tegangan yang terukur pada sisi primer CVT (V_{primer}) dalam keadaan normal adalah sebesar 11,47 kV. V_{primer} ini digunakan sebagai variabel yang dianalisis pada simulasi feroresonansi ini.

4.2.2 Feroresonansi Akibat Impuls Petir

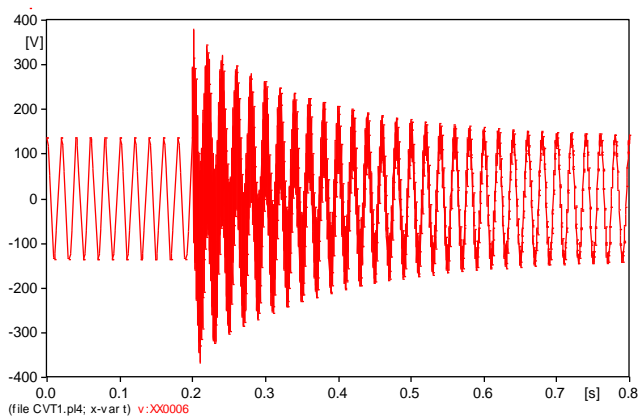
Pada simulasi ini impuls petir dimodelkan dalam bentuk arus impuls yang memiliki bentuk umum $1,2/50 \mu\text{s}$ dan amplitudo 10 kA. Impuls disimulasikan mulai menerpa saluran transmisi pada detik ke- 0,2. Simulasi dijalankan selama 0,8 detik. Sedangkan parameter saluran transmisi pada simulasi ini adalah $R = 0,00001273 \Omega/\text{m}$, $L = 0.0009337 \text{ mH/m}$, dan $C = 0.01274 \mu\text{F/m}$ (sesuai dengan referensi yang ada). Pada simulasi ini dapat dilihat respon tegangan pada sisi primer dan sekunder CVT saat saluran transmisi tersambar petir.



Gambar 4.12 Sinyal arus impuls petir



(a)



(b)

Gambar 4.13 Respon tegangan CVT akibat impuls petir (a) Tegangan primer CVT (b) Tegangan sekunder CVT

Pada Gambar 4.13a dan Gambar 4.13b dapat terlihat bahwa dalam range waktu $t = 0 - 0,2$ detik, bentuk sinyal tegangan baik pada sisi primer maupun sekunder masih sama dengan keadaan normal. Namun setelah detik ke- $0,2$ gelombang impuls petir mengganggu gelombang tegangan sistem sehingga muncul feroresonansi berupa tegangan lebih

dan frekuensi tinggi. Perbandingan antara tegangan awal sebelum terkena petir dan setelah terkena petir dapat dilihat melalui tabel 4.2 berikut.

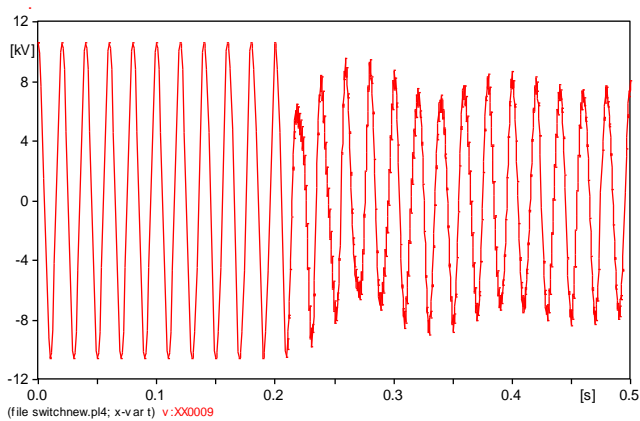
Tabel 4.2 Tabel parametrik CVT sebelum dan sesudah gangguan petir

Tegangan CVT (kV)	Sebelum	Sesudah	Feroresonansi
Sisi Primer	10,58	30	Ya
Sisi Sekunder	0,265	0,390	Ya

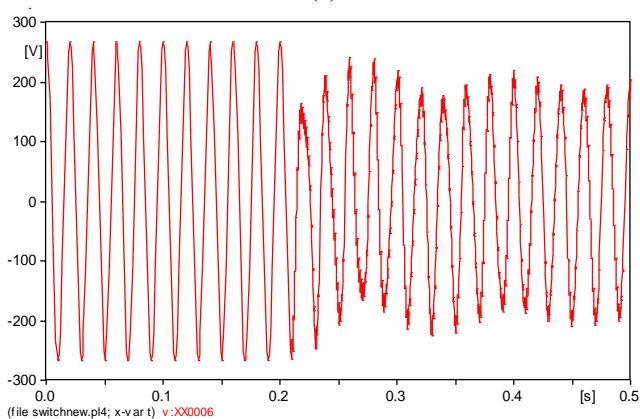
Dari tabel hasil simulasi diatas dapat dilihat bahwa lonjakan tegangan lebih yang sangat tinggi terjadi baik pada sisi primer maupun sekunder CVT. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa untuk parameter gangguan impuls petir, feroresonansi dapat terjadi pada sisi primer dan sekunder CVT. Feroresonansi dapat terjadi akibat adanya arus yang timbul saat adanya interaksi antara reaktansi kapasitif dari saluran transmisi dan reaktansi induktif dari induktor non-linier telah melampaui titik saturasi inti trafo.

4.2.3 Feroresonansi Akibat Operasi *Switching* Circuit Breaker

Gambar 4.7 merupakan representasi pada ATP Draw rangkaian feroresonansi yang terjadi pada CVT akibat pemutusan daya oleh circuit breaker. Pada rangkaian ini terdapat dua buah kapasitansi yakni C_g dan C_s . C_g (*grading capacitance*) merupakan parameter kapasitansi yang muncul akibat pemutusan daya oleh CB, sedangkan C_s merupakan parameter kapasitansi *shunt* dari suatu saluran transmisi. Dalam analisis parametrik ini, nilai C_g dan C_s masing-masing adalah 50 pF dan 63,7 μ F (sesuai dengan referensi yang ada). Pada simulasi sistem diasumsikan mengalami gangguan dan CB terbuka pada detik ke 0,2 dan simulasi dijalankan selama 0,5 detik. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer (V_{primer}) dan tegangan sekunder (V_{sekunder}) CVT.



(a)

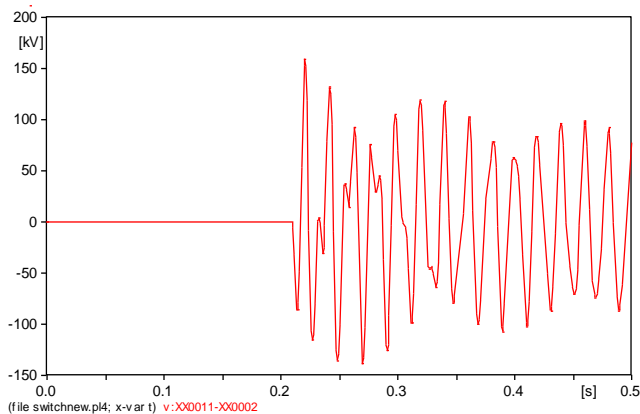


(b)

Gambar 4.14 Respon tegangan CVT akibat *switching* CB (a) Tegangan primer CVT (b) Tegangan sekunder CVT

Dari Gambar 4.14a dan 4.14b dapat dilihat bahwa dalam range waktu $t = 0 - 0,2$ detik bentuk sinyal tegangan baik pada sisi primer maupun sekunder CVT masih sama seperti keadaan normal. Namun setelah 0,2 detik tegangan tersebut diinterferensi oleh tegangan switching oleh CB

sehingga gelombang menjadi cacat (distorsi). Perbandingan tegangan sebelum dan sesudah CB dibuka dapat dilihat melalui Tabel 4.3



Gambar 4.15 Bentuk sinyal tegangan pada terminal CB saat dibuka

Tabel 4.3 Tabel parametrik CVT sebelum dan sesudah CB dibuka

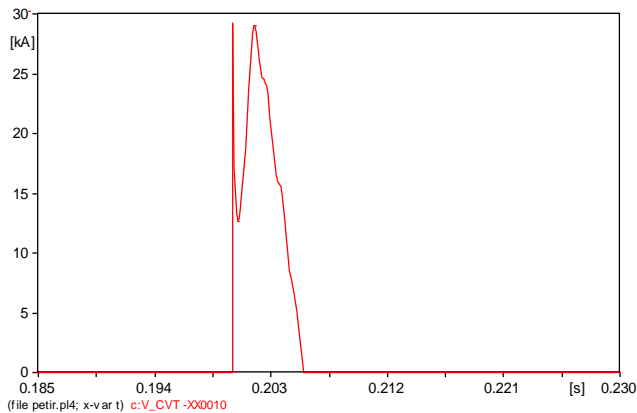
Tegangan CVT (kV)	Sebelum	Sesudah	Feroresonansi
Sisi Primer	10,58	9,537	Tidak
Sisi Sekunder	0,265	0,239	Tidak

Dari Tabel 4.3 diatas dapat dilihat bahwa tidak terjadi tegangan lebih baik pada sisi primer maupun sekunder CVT setelah CB dibuka pada waktu t 0,2 detik. Sehingga dapat dikatakan bahwa untuk parameter *existing* diatas tidak terjadi feroresonansi. Hal tersebut dikarenakan kapasitansi sistem masih mampu meredam sinyal gangguan sehingga interaksi reaktansi kapasitif dan reaktansi induktif non-linier tidak melebihi titik saturasi trafo.

4.2.4 Feroresonansi Akibat Hubung Singkat Fasa ke Tanah

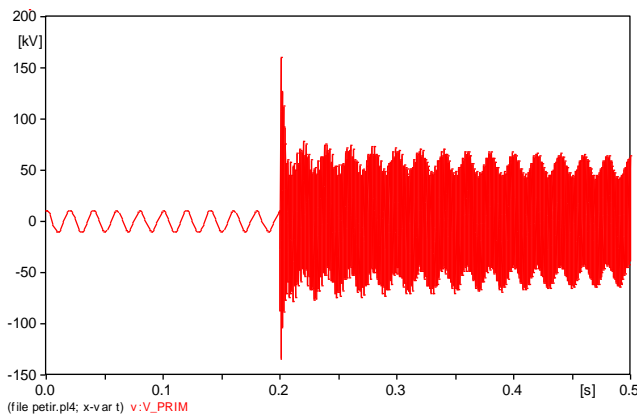
Kegagalan isolator pada tiang saluran transmisi dapat menimbulkan hubung singkat antara kawat fasa dengan tanah. Pada simulasi ini, diasumsikan hubung singkat fasa-tanah terjadi pada saluran

transmisi lumped (Gambar 4.9) sehingga muncul arus hubung singkat sebesar 29,22 kA dari fasa menuju tanah.

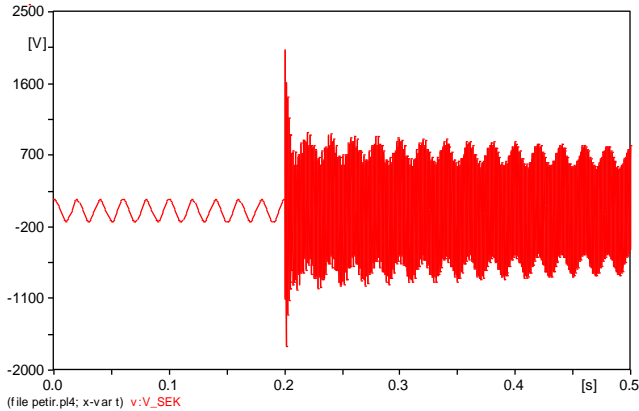


Gambar 4.16 Sinyal arus hubung singkat dari fasa menuju tanah

Pada simulasi ini, fenomena hubung singkat direpresentasikan oleh sebuah *switch* yang menutup pada waktu t 0,2 detik dan terhubung dengan sebuah impedansi R_{hs} sebesar $10\ \Omega$. Sedangkan parameter saluran transmisi *lumped* yang digunakan sama dengan kasus pada sub-bab 4.2.2 diatas. Untuk parameter tersebut, diperoleh hasil sebagai berikut.



(a)



(b)

Gambar 4.17 Respon tegangan CVT akibat hubung singkat fasa - tanah(a) Tegangan primer CVT (b) Tegangan sekunder CVT

Dari Gambar 4.17a dan 4.17b diatas terlihat bahwa setelah switch menutup pada waktu $t = 0,2$ detik terjadi lonjakan tegangan lebih dan frekuensi tinggi baik pada sisi primer maupun sekunder CVT. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa feroresonansi muncul untuk parameter existing diatas. Berikut perbandingan antara tegangan pada CVT sebelum dan sesudah hubung singkat terjadi.

Tabel 4.4 Tabel parametrik CVT sebelum dan sesudah hubung singkat

Tegangan CVT (kV)	Sebelum	Sesudah	Feroresonansi
Sisi primer	10,75	159,9	Ya
Sisi sekunder	0,13	2,02	Ya

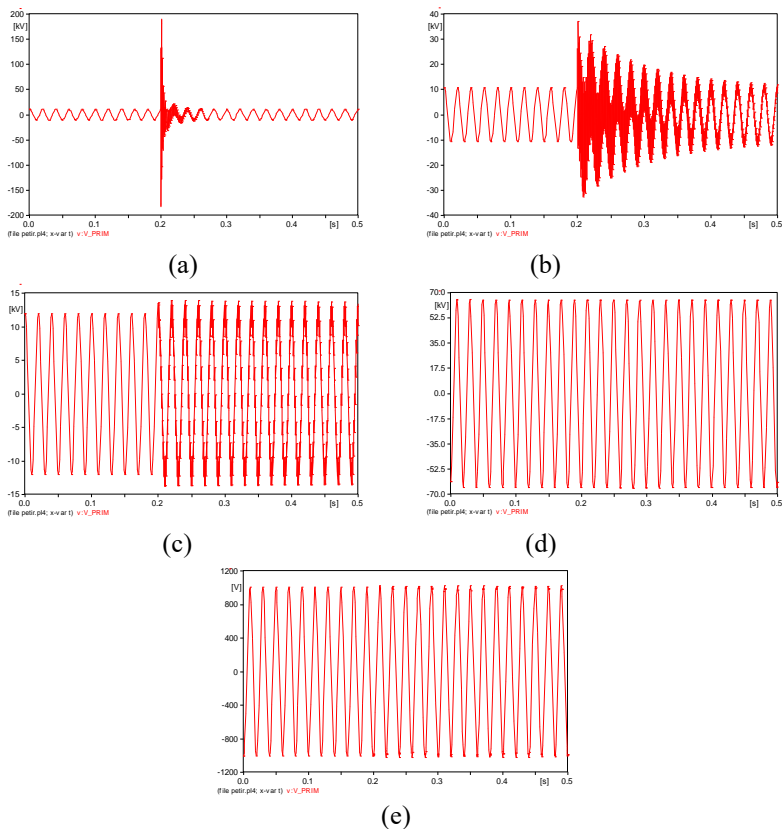
4.3 Analisis Sensitivitas Menggunakan Diagram Bifurkasi

Pada Sub bab 3.4.1 telah dijelaskan bahwa tujuan dari analisis ini adalah untuk menganalisis sensitivitas sistem terhadap kemungkinan-kemungkinan feroresonansi yang terjadi apabila satu atau lebih parameternya diubah-ubah. Salah satu metode analisis sensitivitas yang

sering digunakan adalah diagram bifurkasi. Diagram bifurkasi ini merupakan salah satu solusi dari keterbatasan analisis parametrik berdasarkan hasil plot sinyal ATP Draw yang cenderung lama dan tidak tersaji dalam satu diagram. Dengan kata lain diagram bifurkasi ini mampu merepresentasikan simulasi parametrik yang sangat panjang ke dalam satu grafik saja. Prosedur yang diimplementasikan dalam analisis ini dapat dilihat pada bagan Sub bab 3.4.1. Pada simulasi ini variabel yang diamati cukup hanya V_{primer} CVT saja karena V_{sekunder} memiliki respon sinyal yang sama dengan V_{primer} hanya berbeda amplitudo sinyal saja.

4.3.1 Feroresonansi Akibat Impuls Petir

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa syarat utama dalam analisis ini adalah adanya parameter sistem yang divariasikan pada range tertentu untuk mengetahui respon feroresonansi pada sistem terhadap perubahan tersebut. Dalam kasus gangguan impuls petir ini parameter yang divariasikan adalah nilai kapasitansi saluran. Pada analisis parametrik telah diketahui bahwa feroresonansi muncul untuk kondisi existing tersebut. Pada simulasi ini kapasitansi saluran divariasikan pada nilai $0,001 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$. Sebelumnya dilakukan analisis parametrik untuk beberapa nilai kapasitansi saluran untuk mengetahui bentuk sinyal feroresonansi yang terjadi.



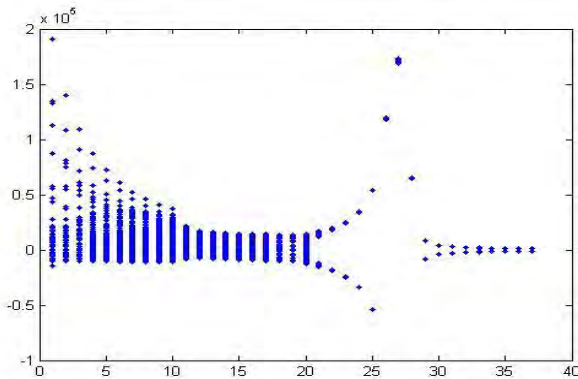
Gambar 4.18 Efek perubahan nilai C_{saluran} (a) $C = 0,001 \mu\text{F}$ (b) $C = 0,01 \mu\text{F}$ (c) $C = 0,1 \mu\text{F}$ (d) $C = 1 \mu\text{F}$ (e) $C = 10 \mu\text{F}$

Dari Gambar 4.18 diatas dapat dilihat bahwa masing-masing nilai kapasitansi memberikan respon yang berbeda-beda. Perbandingan tegangan sisi primer CVT sebelum dan sesudah impuls petir menerpa saluran transmisi dapat dilihat melalui Tabel berikut.

Tabel 4.5 Tabel Parametrik CVT Akibat Variasi Nilai Csaluran

Csaluran (μF)	Tegangan Primer CVT (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,001	10,60	190,39	Ya
0,01	10,72	37,19	Ya
0,1	11,97	13,88	Ya
1	64,93	64,98	Tidak
10	1,004	1,018	Tidak

Dari Gambar 4.18 dan Tabel 4.5 diatas dapat dilihat bahwa terjadi lonjakan tegangan lebih dan frekuensi tinggi pada nilai C_{saluran} 0,001 μF ; 0,01 μF ; dan 0,1 μF setelah 0,2 detik. Sedangkan pada nilai C_{saluran} 1 dan 10 μF sistem memberikan respon yang hampir sama saat sebelum impuls petir menerpa saluran transmisi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem mengalami feroresonansi pada range nilai C_{saluran} 0,001 μF ; 0,01 μF ; dan 0,1 μF . Perubahan variabel V_{primer} yang sangat signifikan terjadi pada C_{saluran} 0,001 – 1 μF yakni perubahan dari tegangan lebih yang sangat tinggi sampai tegangan lebih tersebut teredam pada nilai C_{saluran} 1 μF . Diagram bifurkasi dibawah ini akan menampilkan analisis yang lebih mendalam terkait perubahan variabel V_{primer} pada range kapasitansi tersebut.



Gambar 4.19 Diagram bifurkasi variasi nilai C_{saluran}

Diagram bifurkasi diatas merupakan representasi 37 simulasi variasi nilai-nilai kapasitansi saluran pada *range* 0,001 – 10 μF . Diagram ini secara jelas memperlihatkan respon feroresonansi pada sistem untuk range kapasitansi tersebut. Diagram bifurkasi ini dapat menunjukkan area dimana tegangan cukup stabil dan tegangan yang melonjak tinggi (ditunjukkan dengan area *chaotic*).

Berdasarkan plot diagram bifurkasi ini, feroresonansi *fundamental mode* terdapat pada range 0,02 – 0,2 μF . Hal tersebut dapat dilihat dari titik-titik yang sangat rapat bahkan hampir membentuk suatu garis pada range tersebut. Feroresonansi *subharmonic* atau *quasi-periodic* terdapat pada range 0,001 – 0,01 μF , dapat dilihat dari beberapa titik yang tersebar dari area stabilnya. Feroresonansi tipe *chaotic mode* terdapat pada range 0,3 – 0,7 μF . Hal tersebut dapat dilihat melalui titik-titik yang yang tersebar saling berjauhan dari area stabilnya. Sedangkan pada range 0,8 – 10 μF tidak terjadi feroresonansi. Hal tersebut dapat dilihat dari titik-titik yang jumlahnya sedikit pada range tersebut atau bahkan tidak tersebar.

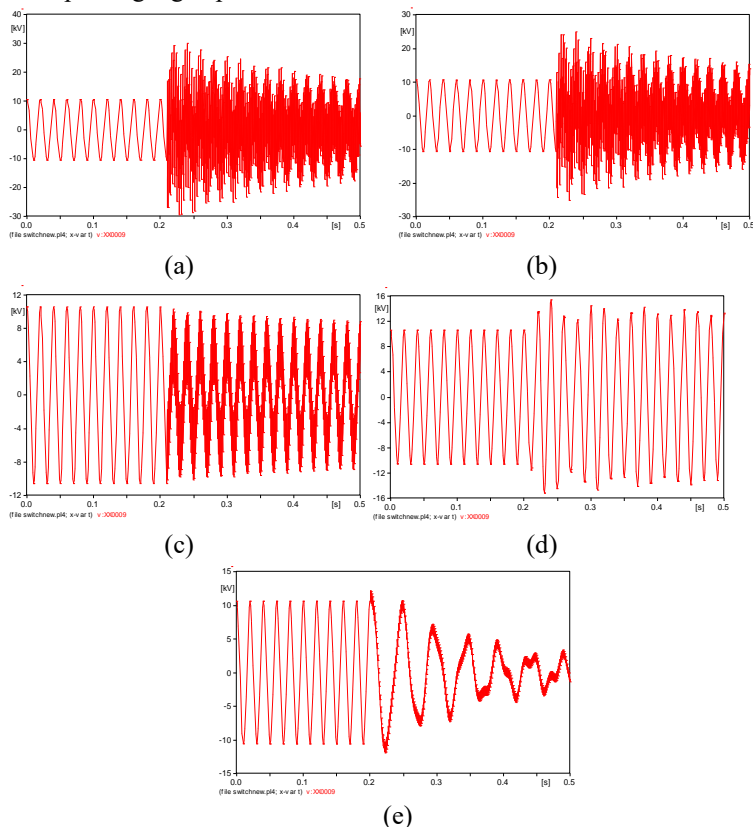
Kesimpulan yang dapat ditarik melalui analisis diagram bifurkasi ini adalah nilai kapasitansi saluran merupakan salah satu parameter yang sangat berpengaruh terhadap feroresonansi yang terjadi pada CVT. Hal tersebut dapat dilihat dari respon yang berbeda-beda untuk masing-masing nilai kapasitansi. Analisis ini juga membuktikan bahwa variasi yang berbeda dapat terjadi diluar parameter sistem *existing* yang tetap ($C_{\text{saluran}} = 0,01274 \mu\text{F/m}$).

4.3.2 Feroresonansi Akibat Operasi Switching Circuit Breaker

Pada simulasi ini terdapat dua parameter kapasitansi diluar kapasitansi perlatan (C_1 dan C_2) yakni *grading capacitance* (C_g) dan *shunt capacitance* (C_s). Kedua nilai kapasitansi ini merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap timbulnya feroresonansi pada CVT dan masing-masing memberikan respon yang berbeda. Pada studi-studi terkait feroresonansi yang lain, waktu switching circuit breaker dijadikan salah satu parameter yang mampu menimbulkan feroresonansi. Namun pada studi ini permasalahan yang dibahas dibatasi pada ruang lingkup kapasitansi (C_g dan C_s). Pada analisis ini simulasi terbagi menjadi dua bagian, yakni perubahan nilai C_g dan C_s .

4.3.2.1 Efek Perubahan Nilai Grading Capacitance (C_g)

C_g merupakan parameter kapasitansi yang muncul akibat pemutusan daya oleh circuit breaker. Untuk melihat efek kapasitansi C_g terhadap kemungkinan feroresonansi yang terjadi, maka pada simulasi ini nilai C_g divariasikan pada nilai 0,001 – 10 μF , sedangkan C_s dibuat tetap pada nilai 63,7 μF . Circuit breaker terbuka pada waktu t 0,2 detik. Berikut hasil plot tegangan pada ATPDraw.



Gambar 4.20 Efek perubahan nilai C_g (a) $C = 0,001 \mu\text{F}$ (b) $C = 0,01 \mu\text{F}$ (c) $C = 0,1 \mu\text{F}$ (d) $C = 1 \mu\text{F}$ (e) $C = 10 \mu\text{F}$

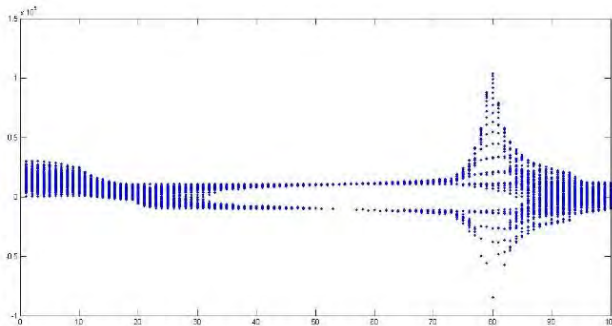
Dari Gambar 4.20 diatas dapat dilihat bahwa masing-masing nilai kapasitansi memberikan respon sinyal tegangan yang berbeda-beda.

Perbandingan tegangan pada sisi primer sebelum dan setelah CB dibuka untuk masing-masing parameter dapat dilihat melalui Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.6 Tabel Parametrik CVT Akibat Variasi C_g

C_g (μF)	Tegangan Primer CVT (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,001	10,58	30,05	Ya
0,01	10,58	24,85	Ya
0,1	10,58	10,29	Tidak
1	10,58	15,46	Ya
10	10,58	12,14	Ya

Dari Gambar 4.20 dan Tabel 4.6 diatas dapat dilihat bahwa terjadi lonjakan tegangan lebih dan frekuensi tinggi pada nilai C_g 0,001 μF - 0,1 μF dan 1 μF – 10 μF setelah 0,2 detik. Sedangkan pada nilai C_g 0,1 μF , sistem memberikan respon yang hampir sama saat sebelum CB dibuka. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem mengalami feroresonansi pada *range* nilai C_g 0,001 μF - 0,1 μF dan 1 μF – 10 μF . Perubahan variabel V_{primer} yang sangat signifikan terjadi pada C_{saluran} 0,01 – 1 μF yakni perubahan dari tegangan lebih yang sangat tinggi sampai tegangan lebih tersebut teredam pada nilai C_{saluran} 0,1 μF . Dari tabel 4.4 diatas dapat dilihat bahwa feroresonansi sempat teredam pada nilai C_g 0,1 namun kemudian feroresonansi muncul kembali pada nilai C_g 1 μF . Diagram bifurkasi dibawah ini akan menampilkan analisis yang lebih mendalam terkait perubahan variabel V_{primer} pada range kapasitansi tersebut.



Gambar 4.21 Diagram bifurkasi variasi nilai C_g

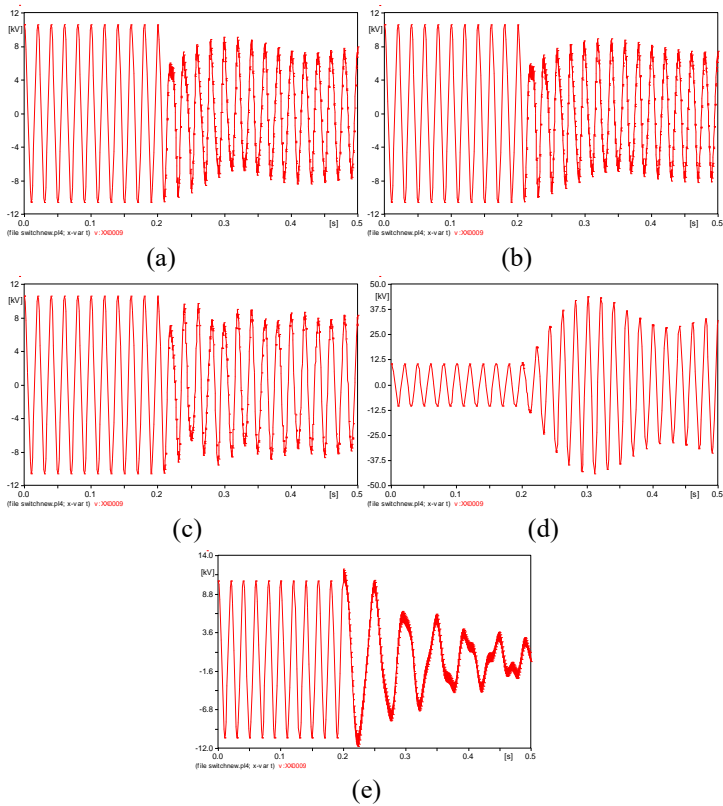
Diagram bifurkasi diatas merupakan representasi 100 simulasi nilai-nilai kapasitansi C_g yang divariasikan pada nilai $0,001 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$. Diagram ini secara jelas memperlihatkan respon feroresonansi pada sistem untuk range kapasitansi tersebut. Diagram bifurkasi ini dapat menunjukkan area dimana tegangan cukup stabil dan tegangan yang melonjak tinggi (ditunjukkan dengan area *chaotic*).

Berdasarkan plot diagram bifurkasi ini, feroresonansi fundamental mode terdapat pada range $0,016 - 0,1 \mu\text{F}$. Hal tersebut dapat dilihat dari titik-titik yang sangat rapat bahkan hampir membentuk suatu garis pada range tersebut. Feroresonansi subharmonic atau quasi-periodic terdapat pada range $0,001 - 0,015 \mu\text{F}$, dan pada range $4 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$ dapat dilihat dari beberapa titik yang tersebar dari area stabilnya. Feroresonansi tipe chaotic mode terdapat pada range $1 \mu\text{F} - 3 \mu\text{F}$. Hal tersebut dapat dilihat melalui titik-titik yang tersebar saling berjauhan dari area stabilnya. Sedangkan pada range $0,4 - 10 \mu\text{F}$ tidak terjadi feroresonansi. Hal tersebut dapat dilihat dari titik-titik yang jumlahnya sedikit pada range tersebut atau bahkan tidak tersebar.

4.3.2.2 Efek Perubahan Nilai Shunt Capacitance (C_s)

Dalam studi ini, *shunt capacitance* (C_s) merupakan representasi nilai kapasitif suatu saluran transmisi. Studi terkait feroresonansi lain juga mengatakan bahwa C_s dapat berupa efek kapasitif dari penggunaan kapasitor bank. Untuk melihat efek kapasitansi C_s terhadap kemungkinan feroresonansi yang terjadi, maka pada simulasi ini

nilai C_g divariasikan pada nilai $0,001 - 10 \mu\text{F}$, sedangkan C_g dibuat tetap pada nilai 50 pF . Circuit breaker terbuka pada waktu $t \text{ } 0,2 \text{ detik}$. Sebelumnya dilakukan analisis parametrik pada ATPDraw untuk melihat bentuk sinyal respon feresonansi.



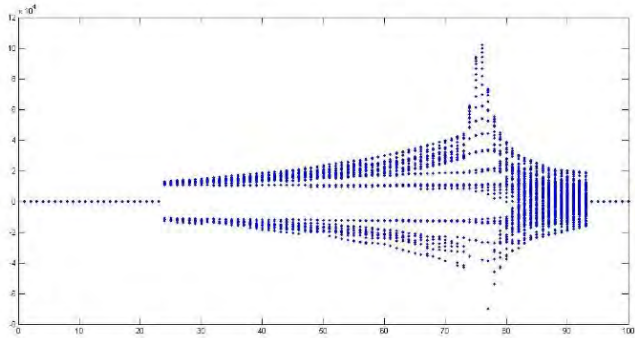
Gambar 4.22 Efek perubahan nilai C_s (a) $C = 0,001 \mu\text{F}$ (b) $C = 0,01 \mu\text{F}$ (c) $C = 0,1 \mu\text{F}$ (d) $C = 1 \mu\text{F}$ (e) $C = 10 \mu\text{F}$

Dari Gambar 4.22 diatas dapat dilihat bahwa masing-masing nilai kapasitansi memberikan respon sinyal tegangan yang berbeda-beda. Perbandingan tegangan pada sisi primer sebelum dan setelah CB dibuka untuk masing-masing parameter dapat dilihat melalui Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Tabel Parametrik CVT Akibat Variasi Nilai C_s

C_s (μF)	Tegangan Primer CVT (kV)		Ferroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,0010	10,58	8,913	Tidak
0,01	10,58	9,9138	Tidak
0,1	10,58	9,721	Tidak
1	10,58	43,92	Ya
10	10,58	12,15	Ya

Dari Gambar 4.22 dan Tabel 4.7 diatas dapat dilihat bahwa terjadi lonjakan tegangan lebih dan frekuensi tinggi pada nilai C_s 1 μF dan 10 μF setelah 0,2 detik. Sedangkan pada nilai C_s 0,001 μF ; 0,01 μF ; dan 0,1 μF sistem memberikan respon yang hampir sama saat sebelum CB dibuka. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem mengalami feroresonansi pada range nilai C_g 1 μF dan 10 μF . Perubahan variabel V_{primer} yang sangat signifikan terjadi pada $C_{saluran}$ 0,1 – 1 μF yakni peralihan yang cukup besar antara kondisi terjadi feroresonansi dan feroresonansi teredam pada nilai C_s 1 μF . Diagram bifurkasi dibawah ini akan menampilkan analisis yang lebih mendalam terkait perubahan variabel V_{primer} pada range kapasitansi tersebut.



Gambar 4.23 Diagram bifurkasi variasi nilai C_s

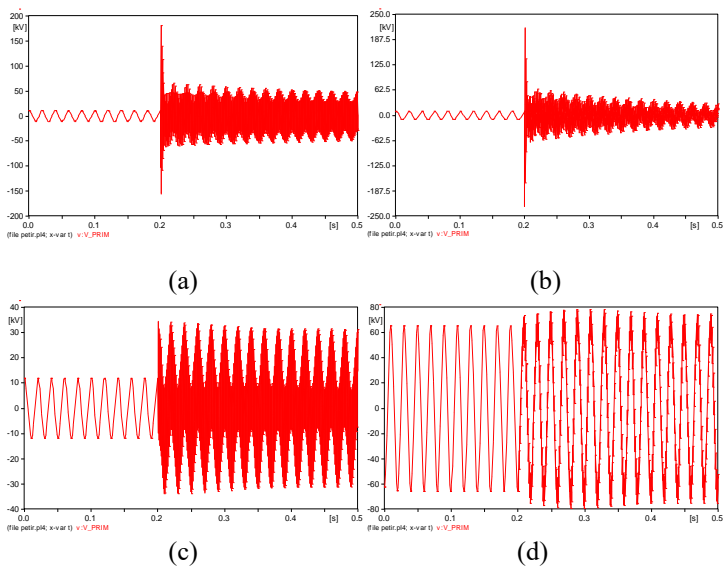
Diagram bifurkasi diatas merupakan representasi 100 simulasi nilai-nilai kapasitansi C_s yang divariasikan pada nilai 0,001 – 10 μF . Diagram ini secara jelas memperlihatkan respon feroresonansi pada

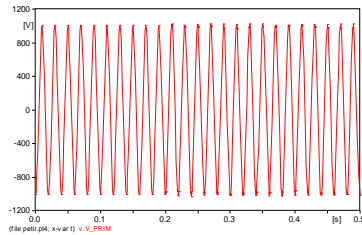
sistem untuk range kapasitansi tersebut. Diagram bifurkasi ini dapat menunjukkan area dimana tegangan cukup stabil dan tegangan yang melonjak tinggi (ditunjukkan dengan area *chaotic*).

Berdasarkan plot diagram bifurkasi ini, dapat dilihat bahwa feroresonansi subharmonik atau quasi periodik sangat mendominasi. Daerah chaotic ditunjukkan oleh titik-titik yang tersebar berjauhan dari area stabilnya. Daerah itu ditunjukkan pada range C_s $0,5 \mu\text{F} - 1 \mu\text{F}$. Sedangkan daerah yang tidak mengalami feroresonansi ditunjukkan pada range $0,001 - 0,2 \mu\text{F}$

4.3.3 Feroresonansi Akibat Hubung Singkat Fasa ke Tanah

Hubung singkat fasa ke tanah merupakan gangguan yang sering terjadi pada sistem transmisi tenaga listrik. Pada bagian ini akan dijelaskan pengaruh tersebut terhadap kemunculan feroresonansi serta seberapa besar pengaruh potensi tersebut terhadap feroresonansi pada CVT. Pada simulasi ini gangguan hubung singkat direpresentasikan oleh saklar S yang terhubung dengan suatu impedansi 10Ω dimana saklar tersebut menutup (*close*) pada waktu t 0,2 detik.





(e)

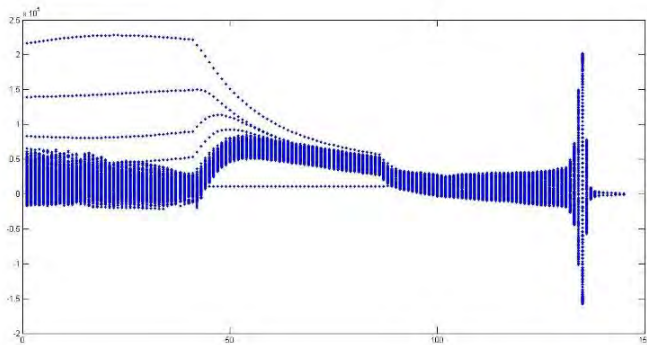
Gambar 4.24 Efek perubahan nilai $C_{saluran}$ (a) $C = 0,001 \mu F$ (b) $C = 0,01 \mu F$ (c) $C = 0,1 \mu F$ (d) $C = 1 \mu F$ (e) $C = 10 \mu F$

Dari hasil simulasi menggunakan ATPDraw dengan variasi kapasitansi saluran pada model *Lumped RLC-Pi 1 phase* pada range $0,001 \mu F - 10 \mu F$ diperoleh keadaan dimana feroresonansi terjadi pada range nilai kapasitansi $0,001 \mu F - 1 \mu F$, dan feroresonansi mulai teredam pada nilai $10 \mu F$. Perbandingan tegangan pada sisi primer CVT saebelum dan sesudah hubung singkat terjadi dapat dilihat melalui tabel berikut.

Tabel 4.8 Tabel Parametrik CVT akibat gangguan hubung singkat

$C_{saluran} (\mu F)$	Tegangan Primer CVT (kV)		Ferroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,001	10,60	216,2	Ya
0,01	10,72	180,77	Ya
0,1	11,97	34,32	Ya
1	64,93	78,38	Ya
10	1,004	1,003	Tidak

Dari Tabel 4.8 diatas terlihat jelas terjadi lonjakan tegangan lebih pada range $0,001 \mu F - 1 \mu F$ serta perubahan tegangan yang signifikan dan tidak linier pada range $0,1 \mu F - 10 \mu F$. Selain itu pada kasus ini, feroresonansi terjadi pada range yang lebih lebar jika dibandingkan dengan dua kasus sebelumnya. Oleh sebab itu diperlukan analisis yang lebih mendalam melalui diagram bifurkasi berikut.



Gambar 4.25 Diagram bifurkasi variasi nilai C_{saluran}

Diagram bifurkasi diatas merupakan hasil dari 100 simulasi variasi nilai kapasitansi saluran pada *range* $0,001 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$. Dari diagram diatas, feresonansi tidak terjadi pada *range* $4 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$, ditunjukkan dengan titik-titik yang sedikit pada daerah tersebut. Sedangkan pada *range* $0,001 \mu\text{F} - 3 \mu\text{F}$ dapat dikatakan sistem tersebut mengalami feresonansi. Diagram diatas juga mewakili klasifikasi feresonansi yang telah dijelaskan pada bab 3, yakni *fundamental mode*, *sub-harmonic/ quasi-periodic mode*, dan *chaotic mode*.

Dari diagram diatas, *fundamental mode* terjadi pada *range* $0,08 \mu\text{F} - 0,6 \mu\text{F}$. Hal tersebut ditandai denga sebaran titik-titik yang sangat rapat bahkan hampir membentuk garis pada daerah tersebut. *Sub-harmonic/quasi-periodic mode* terjadi pada *range* $0,001 \mu\text{F} - 0,07 \mu\text{F}$. Hal ini ditandai dengan bahwa pada *range* kapasitansi tersebut terdapat sebagian titik-titik yang tersebar dari daerah stabilnya. Pada *range* $0,001 \mu\text{F} - 0,015 \mu\text{F}$ terlihat beberapa titik yang tersebar sangat jauh dari daerah stabilnya. Hal itu menunjukkan bahwa pada area tersebut terjadi lonjakan tegangan lebih yang signifikan. *Chaotic mode* terjadi pada *range* $0,7 \mu\text{F} - 3 \mu\text{F}$. Hal tersebut ditandai dengan sebaran sebagian besar atau bahkan keseluruhan titik dan tidak teratur. *Chaotic mode* yang sangat jelas terjadi pada nilai kapasitansi $1 \mu\text{F}$.

4.3.4 Perbandingan Hasil Simulasi

Perbandingan hasil simulasi dari ketiga kejadian diatas dapat dilihat melalui tabel berikut.

Tabel 4.9 Tabel komparasi diagram bifurkasi

Fenomena	Range Nilai Kapasitansi (μF)			
	Impuls Petir (C_{saluran})	Switching CB		Hubung Singkat (C_{saluran})
		C_g	C_s	
Tidak Feroresonansi	0,8 - 10	0,4 - 10	0,001 – 0,4 4 – 10	4 - 10
Fundamental mode	0,002 - 0,2	0,016 - 0,1	-	0,08 - 0,6
Sub-harmonic mode	0,001 - 0,01	0,001 - 0,015	0,5 - 0,77	0,001 - 0,07
Chaotic mode	0,3 - 0,7	1 - 3	2,3 - 3	0,7 - 3

Tabel 4.9 diatas menunjukkan bahwa variasi nilai-nilai kapasitansi untuk masing-masing parameter gangguan sangat berpengaruh terhadap timbulnya feroresonansi. Masing-masing gangguan memberikan respon feroresonansi yang berbeda-beda.

Feroresonansi tidak muncul pada *range* kapasitansi yang lebih besar ($4 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$) dipicu oleh CB yang terbuka dengan variasi nilai C_s dan gangguan hubung singkat fasa – tanah. Selain itu, feroresonansi tidak muncul pada dua range yang berbeda untuk variasi nilai C_s .

Range feroresonansi *fundamental mode* terbesar dipicu oleh gangguan impuls petir ($0,002 \mu\text{F} - 0,2 \mu\text{F}$). Sementara variasi nilai C_s yang dipicu oleh switching CB tidak memunculkan fundamental sama sekali.

Respon yang dihasilkan oleh variasi nilai C_s pada saat CB terbuka didominasi oleh tahap sub-harmonic mode ($0,5 \text{ F} - 0,77 \mu\text{F}$ dan $2,3 \mu\text{F}$ dan $3 \mu\text{F}$).

Respon chaotic paling besar dipicu oleh gangguan hubung singkat fasa ke tanah ($0,7 \mu\text{F} - 3 \mu\text{F}$).

Dari Tabel 4.9 diatas juga dapat disimpulkan bahwa kemunculan feroresonansi tidak didasarkan oleh kenaikan ataupun penurunan nilai kapasitansi pada sistem. Atau dengan kata lain kemunculannya tidak linier terhadap perubahan nilai kapasitansi. Hal tersebut ditunjukkan oleh beberapa tahap feroresonansi yang muncul pada daerah/ *range* yang berbeda.

LAMPIRAN

Listing program diagram bifurkasi pada MATLAB:

```
clc;
clear;
hit = 0;
hasilx = [];
hasily = [];
for nn = 1 : 100,
    puncak = [];
    namafile = [sprintf('%03d',nn), '.mat'];
    load(namafile);
    puncak = findpeaks(vXx0009);
    for ii = 1 : size(puncak,1)
        hit = hit + 1;
        hasilx(hit) = nn;
        hasily(hit) = puncak(ii);
    end
end
plot(hasilx,hasily, '.');
```

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis yang dilakukan terkait pengaruh kapasitansi terhadap feroresonansi yang terjadi pada sistem tenaga listrik, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Feroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian feroresonansi dengan parameter gangguan impuls petir muncul pada variasi nilai kapasitansi *lumped* saluran transmisi $0,001 \mu\text{F} - 0,7 \mu\text{F}$. Diagram bifurkasi menunjukkan bahwa feroresonansi yang terjadi pada range tersebut didominasi oleh *fundamental mode* ($0,002 \mu\text{F} - 0,2 \mu\text{F}$) dan *sub-harmonic mode* ($0,001 \mu\text{F} - 0,01 \mu\text{F}$). Selain itu, melalui diagram ini dapat diketahui bahwa lonjakan *overvoltage* yang sangat tinggi terjadi pada variasi kapasitansi $0,001 \mu\text{F} - 0,003 \mu\text{F}$ (*sub-harmonic mode*). Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada variasi kapasitansi yang lebih besar, yakni $0,8 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$.
2. Feroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian feroresonansi dengan parameter gangguan switching CB muncul pada dua range variasi nilai *grading capacitance* (C_g) yang berbeda, yakni pada range $0,001 \mu\text{F} - 0,76 \mu\text{F}$ dan $0,88 - 10 \mu\text{F}$. Diagram bifurkasi yang diperoleh membuktikan bahwa feroresonansi yang terjadi pada range tersebut didominasi oleh subharmonic mode yakni pada range $0,001 \mu\text{F} - 0,05 \mu\text{F}$ dan $3 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$. Selain itu, melalui diagram ini dapat diketahui bahwa lonjakan *overvoltage* yang sangat tinggi terjadi pada variasi kapasitansi $0,97 \mu\text{F} - 2,5 \mu\text{F}$ (*chaotic mode*) yakni mencapai 50 kV.
3. Feroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian feroresonansi dengan parameter gangguan switching CB muncul pada variasi nilai *shunt capacitance* (C_s) $0,51 \mu\text{F} - 3 \mu\text{F}$. Diagram bifurkasi menunjukkan bahwa feroresonansi yang terjadi pada range tersebut didominasi oleh chaotic mode ($0,52 \mu\text{F} - 0,98 \mu\text{F}$) serta diikuti oleh lonjakan *overvoltage* yang signifikan pada range $1 \mu\text{F} - 1,5 \mu\text{F}$ yakni mencapai 100 kV. Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada range $0,001 \mu\text{F} - 0,4 \mu\text{F}$ dan $4 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$.
4. Feroresonansi yang terjadi pada pemodelan rangkaian feroresonansi dengan parameter gangguan hubung singkat fasa ke tanah muncul pada variasi nilai kapasitansi *lumped* saluran transmisi $0,001 \mu\text{F} - 3$

μF . Diagram bifurkasi yang diperoleh menunjukkan bahwa feroresonansi yang terjadi pada rentang tersebut didominasi oleh subharmonic mode ($0,001 \mu\text{F} - 0,07 \mu\text{F}$). Selain itu melalui diagram ini dapat diketahui bahwa lonjakan overvoltage yang sangat signifikan terjadi pada rentang subharmonic mode. Sedangkan feroresonansi tidak terjadi pada rentang kapasitansi $4 \mu\text{F} - 10 \mu\text{F}$.

5. Kapasitansi merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap munculnya feroresonansi. Pada saluran transmisi, untuk saluran daya yang panjangnya kurang dari 80 km (saluran pendek) pengaruh kapasitansi saluran ke tanah sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Namun untuk saluran menengah pengaruh kapasitansi tersebut tidak dapat diabaikan. Persamaan umum nilai kapasitansi saluran ke tanah adalah:

$$C = \frac{0,02413}{\log \frac{2h}{r}} \mu\text{F}/\text{km}$$

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk memperoleh nilai kapasitansi yang diinginkan maka variabel yang disesuaikan adalah h (jarak konduktor dengan tanah) atau r (radius konduktor). Atau dengan kata lain dalam aplikasinya, parameter jenis konduktor kawat transmisi dan tinggi menara transmisi dapat menjadi pertimbangan.

6. Diagram bifurkasi merupakan metode yang efektif untuk analisis sensitivitas suatu sistem terhadap perubahan nilai-nilai parameter pada sistem itu sendiri. Studi ini membuktikan bahwa diagram bifurkasi mampu merepresentasikan respon feroresonansi yang terjadi pada CVT terhadap perubahan/ variasi nilai kapasitansi pada sistem. Diagram bifurkasi yang diperoleh dari berbagai macam kasus dalam studi ini membuktikan bahwa feroresonansi pada CVT muncul pada rentang kapasitansi yang berbeda-beda, atau dengan kata lain kemunculannya tidak berdasarkan kenaikan ataupun penurunan nilai kapasitansi.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari studi ini adalah melakukan studi lebih lanjut terkait feroresonansi pada sebuah sistem untuk melihat apakah komponen pada sistem dapat mempengaruhi kemunculan feroresonansi. Studi ini merupakan tahap awal identifikasi gejala-gejala

feroresonansi pada sistem tenaga listrik sehingga kedepannya studi ini dapat dikembangkan lebih lanjut dan dijadikan acuan untuk mengambil kebijakan untuk mengganti beberapa komponen yang dapat menyebabkan feroresonansi maupun desain parameter sistem.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Charles K. Alexander dan Matthew N.O. Sadiku, *“Fundamental of Electric Circuits 4th Edition”*, McGraw-Hill, USA , 2007.
- [2]. Bakar, A.H.A. *“Analysis of lighting-caused ferroresonance in Capacitor Voltage Transformer (CVT)”*. Elsevier.2011.Electrical Power and Energy System 33 pp 1536-1541.
- [3]. Daniel Krajtner, and Igor Ziger, *“Influence of HV Inductive Voltage Transformers Core Design to The Ferroresonance Occurance Probability”*, IPST 2015, Croatia, 2015.
- [4]. E. Martinez, G. Antonova and M. Olgun, *“Ferroresonance Phenomenon in CFE, its Origin and Effects”*, IPST 2013, Vancouver, 2013.
- [5]. Ferraci, P., *“Ferroresonance”*, Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28, Maret, 1998.
- [6]. Javier Arturo Corea Araujo, *“Modeling And Analysis Of Power Transformers Under Ferroresonance Phenomenon”*, Universitat Rovira, Virgili, 2015.
- [7]. Javier A. Corea-Araujo, Francisco Gonzales-Molina, Juan A. Martinez, Jose A. Barrado-Rodrigo, and Luis Guasch-Pesquer, *“Tools for Characterization and Assessment of Ferroresonance Using 3-D Bifurcation Diagrams”*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 6, 2014.
- [8]. Novandi Wijayanto, I Made Yulistya Negara, dan I Gusti Ngurah Satriyadi, *“Studi Ferroresonance Akibat Sambaran Petir pada Capacitive Voltage Transformer (CVT) Saluran Transmisi 500 kV”*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [9]. Preecha Sakarung, Teratam Bunyagul, and Somchai Chatratana, *“Investigation and Mitigation of Overvoltage Due to Ferroresonance in the Distribution Network”*, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 2, No. 3, 2007.
- [10]. Preecha Sakarung, *“Bifurcation Diagram with Electromagnetic Transient Program (EMTP) for Ferroresonance Analysis”*, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Thailand, 2011.

- [11]. Satria Seventino Simamora, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, "*Studi Pemasangan Damping Reaktor Untuk Mengatasi Ferroresonansi Pada Incoming 20 KV GIS Tandes*", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [12]. Stephen J. Chapman, "*Electric Machinery Fundamentals 5th edition*", Mc- Graw Hill, USA, 2012.
- [13]. Swee Peng Ang, "*Ferroresonance Simulation Studies of Transmission Systems*", School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester, 2010.
- [14]. Zulkurnain Abdul Malek, S.J.Mirazimi, Kamyar Mehranzamir, and Behnam Salimi, "*Effect of Shunt Capacitance on Ferroresonance Model for Distribution Voltage Transformer*", ISIEA 2012, Bandung, 2012.
- [15]. Edwin Cardenascaba, "*Outdoor Switchgear Installation*", <http://www.slideshare.net/edwincardenascaba/perfiles-13211814>

BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Jeremia Septa Pratama Sinuraya, dan nama panggilan Jeremi. Penulis lahir di Kota Pematangsiantar pada tanggal 1 September 1994. Penulis mulai menempuh pendidikan formal di TK Assisi Pematangsiantar pada tahun 1999 – 2000. Kemudian melanjutkan pendidikan dasar pada tahun 2000 – 2006 di SD Assisi Pematangsiantar. Setelah lulus dari jenjang pendidikan dasar, penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP RK Bintang Timur Pematangsiantar pada tahun 2006 – 2009 serta menempuh pendidikan menengah atas di SMA RK Budi Mulia Pematangsiantar pada tahun 2009 – 2012. Pada tahun 2012 penulis memutuskan untuk melanjutkan pendidikan ke jenjang Perguruan Tinggi di Jurusan Teknik Elektro ITS pada tahun 2012 dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama berstatus sebagai mahasiswa, penulis aktif dalam berorganisasi dan berkarya di bidang musik dan akademik. Saat ini penulis aktif sebagai asisten di Laboratorium Tegangan Tinggi Elektro ITS.

Email: jeremia.sinuraya94@gmail.com